



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Discipline ou spécialité :

Génie mécanique, mécanique des matériaux

Présentée et soutenue par :

Laura BALEA

le : lundi 11 avril 2011

Titre :

Comportement des matériaux composites à renforts tricotés élaborés par
injection de résine

Ecole doctorale :

Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGeP)

Unité de recherche :

Institut Clément Ader, Ecole des Mines d'Albi

Directeur(s) de Thèse :

Gérard BERNHART - Professeur des Ecoles des Mines - Ecole des Mines, Albi

Rapporteurs :

Philippe BOISSE - Professeur des Universités - INSA, Lyon

Arnaud POITOU - Professeur des Universités - Ecole Centrale, Nantes

Autre(s) membre(s) du jury

Anne PERWUELZ - Professeur des Universités - ENSAIT, Roubaix

Francis COLLOMBET - Professeur des Universités - Université de Toulouse III, Toulouse

Nicolas DUMONT - Ingénieur R&D - JTT Composites, Bordeaux

Gérard BERNHART - Professeur des Ecoles des Mines - Ecole des Mines, Albi

Gilles DUSSERRE - Ingénieur de recherche - Docteur - Ecole des Mines, Albi

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Gérard BERNHART, mon directeur de thèse, pour son encadrement, ses précieux conseils et sa confiance. Je remercie également Gilles DUSSERRE, co-encadrant, pour sa disponibilité, ses remarques pertinentes et l'ensemble de ses apports techniques, scientifiques et humains, indispensables au bon déroulement de cette thèse.

Je remercie Philippe BOISSE et Arnaud POITOU d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi que Anne PERWUELZ et Francis COLLOMBET de m'avoir fait l'honneur d'être membres du jury.

J'exprime ma gratitude au personnel de Textile Aéro Tarn et plus particulièrement merci à Nicolas DUMONT, qui m'a fait l'honneur de participer au jury de thèse, pour son enseignement sur la partie textile, la confection des tricotés et sa disponibilité tout au long de la thèse. Un grand merci à Francis PLANELL également pour la confection des tricotés.

Je remercie tous les membres du personnel de l'ICA-Albi pour m'avoir permis de travailler dans une très bonne et agréable ambiance de travail qui me manquera. J'adresse un merci particulier à Esther et Cathy. Merci à Guillaume Thevenin, pour sa contribution aux observations MEBE et merci à Naoufel Ben Salem, pour sa grande contribution à la partie essais sur composites. Je remercie également toutes les personnes avec qui j'ai eu l'occasion de travailler ponctuellement pour leur disponibilité.

Un grand merci à tous les collègues du bureau 1M07. Merci pour la bonne ambiance de travail que vous avez créé, et surtout merci pour ces nombreuses discussions plus ou moins sérieuses et pour tous les moments de franche rigolade. Alors merci à Romu, Ines, Julien, Renaud, Fabio, Seb, Sawsane, Yannick, Jérémy, Lisa...

En pensant à cette thèse à Albi, je me souviendrai toujours de tous les collègues et amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables. Merci Guy' d'avoir été mon compagnon de concerts, festivals, conférences, campings, et de discussions instantanés au sujet de LaTeX. Merci Popo, entre un grand nombre de souvenirs et de moments de rigolades les larmes aux yeux, je garde en mémoire cette magnifique journée franco-italienne au ski, et au passage, je me dois de citer duch'; c'était une journée au TOP grâce à vous 2!! Merci Antho pour ta bonne humeur permanente, je me souviendrai de l'accueil à Bruxelles, cette capitale si floue à mes yeux. Merci Vaness pour ces soirées toulousaines mémorables et ces nombreuses discussions autour de la thèse de la soutenance. Merci Rémi pour tes blagues, tout simplement, sacré personnage! Merci Nico, je me souviendrai par exemple du séjour à Budapest (Merci à Pierre de nous y avoir accueillis et montré les bons coins). Merci Chris pour ton look d'enfer

au ski à Ax, tu me feras certainement toujours marrer. Merci Nioc de m'avoir initiée à LaTeX, tu auras contribué à cette thèse, mais surtout sans toi je n'aurai peut-être jamais connu Brive. Merci Trup', on aura bien partagé nos moments de doutes et de joie et de soulagement au sulli pendant et après la rédaction. Merci Cédric, pour tous ces barbecues. Merci Myriam, pour les soirées bucheronnage. Merci Anais, on aura partagé une excursion à vélo mémorable à Lombers... Des souvenirs albigeois, il restera aussi forcément le foot. Alors merci à tous les footeux (Thomas, Philippe, Olivier B., Olivier D., Laurent, Rémi, Antho, Guy', Nioc, Auré, Jean-Mi, Jean-Jacques, Myriam, Arezki, Younes, Sami...). Et merci aux volleyeurs également.

Je pense également aux personnes hors de l'Ecole des Mines que j'ai pu rencontrer pendant cette période : je pense notamment à Carole, à Olive de Montpel, à Raphael, à Alex, à Sylvain et bien d'autres.

Merci à tous ceux que j'oublie... il y en a certainement un grand nombre.

Ces années n'auraient pas été les mêmes sans les acteurs de la vie albigeoise et alentours. Je me souviendrai du sulli et son quizz, de Fabrice et son jour d'œuf, de Malik (ou Pat) et son Cosy, de Pollux asso, du Rex de Toulouse, du Bikini, d'Origines Controlées, de Skabazac, de Chapiteuf, de Complot sur le Campus, de Cravirola entre autres... Beaucoup d'endroits et d'évènements qui ont ajouté de nombreux souvenirs à ces quelques années.

Une mention spéciale pour la coloc de Lescure et ses nombreux apéros, barbecs, pétanques, piscine et soirées dans le garage. Merci à ses habitants (Guy', Nioc, Trup', Rémi, Christophe).

Une grande pensée pour tous les amis parisiens, lyonnais ou d'ailleurs : Fred, Tranbert, Thomas, Alma, Leina, Guigui, Alizée, Balek, Mélanie, Youy, Richard, Tonio, Sandrine...

Et le plus important pour la fin : je tiens tout particulièrement à remercier ma famille, mes parents, mon frère et sa famille (Yolène, Guillaume et Louise). Merci à vous pour votre confiance, vos encouragements, votre aide si précieuse et votre soutien inestimable. Cette thèse vous est dédiée.

Table des matières

Nomenclature	ix
Introduction générale	1
1 Étude bibliographique	3
1.1 Une introduction aux matériaux composites à matrice organique	5
1.1.1 Généralités sur les matériaux composites	5
1.1.1.1 Définition et description générale	5
1.1.1.2 Classification des matériaux composites	5
1.1.2 Composites à matrice organique : les constituants	6
1.1.2.1 La matrice	6
1.1.2.2 Le renfort fibreux	7
1.1.3 Composites à matrice organique : La mise en œuvre	10
1.2 Les textiles tricotés	12
1.2.1 Mise en œuvre d'un tricot	12
1.2.1.1 Les tricots à mailles cueillies :	13
1.2.1.2 Les tricots à mailles jetées :	13
1.2.2 Les tricots à mailles cueillies	14
1.2.2.1 Description du processus de tricotage des tricots à mailles cueillies	14
1.2.2.2 Contextures	15
1.2.3 Les caractéristiques des tricots	17
1.2.3.1 Caractéristiques des mèches	18
1.2.3.2 Paramètres de tricotage	20
1.2.3.3 Influence des paramètres sur les propriétés des tricots	20
1.3 Intérêt des textiles tricotés pour la mise en œuvre de composites	21
1.3.1 Préformes de formes complexes	21
1.3.2 Déformabilité des textiles tricotés	21
1.3.3 Intégration dans les procédés de mise en œuvre	23
1.4 Propriétés mécaniques des composites à renforts tricotés	24
1.4.1 Comportement en traction	24
1.4.1.1 Propriétés en traction	24
1.4.1.2 Mode d'endommagement	27
1.4.2 Comportement en compression	28
1.4.3 Tenue à l'impact	29
1.5 Modélisation des textiles tricotés et de leur comportement	31
1.5.1 Modélisation géométrique de la maille	31

1.5.2	Modélisation mécanique de la maille	32
1.5.3	Modélisation du comportement de textiles tricotés	33
1.5.3.1	Modèles analytiques	33
1.5.3.2	Modèles numériques	34
1.6	Modélisation des propriétés élastiques des composites à renforts tricotés	35
1.6.1	Démarche adoptée dans la modélisation des composites à renforts tricotés	35
1.6.2	Approche théorique du comportement élastique d'un composite unidirectionnel	36
1.6.2.1	Loi de Hooke pour un composite unidirectionnel	36
1.6.2.2	Détermination des modules d'élasticité	38
1.6.2.3	Les modèles d'homogénéisation :	38
1.6.3	Comportement élastique d'un composite à renfort tricoté	40
1.6.3.1	Modèle de Krenchel	40
1.6.3.2	Approche de Ruan et Chou	42
1.6.3.3	Approche de Gommers	43
1.6.3.4	Modèle de Ramakrishna (cross-over model)	43
1.7	Conclusion du chapitre	46
2	Étude de la déformabilité des textiles tricotés	47
2.1	Fibres et préformes tricotées	49
2.1.1	Fibres	49
2.1.1.1	Choix des mèches	49
2.1.1.2	Caractéristiques de mèches	49
2.1.2	Contextures tricotées simples	51
2.1.2.1	Mise en œuvre des textiles tricotés	51
2.1.2.2	Éprouvettes	53
2.2	Essais de traction uni-axiale	55
2.2.1	Moyens et procédure	55
2.2.1.1	Équipement	55
2.2.1.2	Procédure	56
2.2.2	Exploitation des résultats	57
2.3	Comportement des tricots secs simples	58
2.3.1	Comportement général d'un tricot sec	58
2.3.2	Comportement structural du tricot	62
2.3.2.1	Influence de la contexture	63
2.3.2.2	Influence de la direction de sollicitation	67
2.3.2.3	Influence de la nature de la fibre	67
2.3.2.4	Conclusion sur la déformation structurale des tricots	70
2.3.3	Reprise d'effort par les fibres	71
2.3.3.1	Influence de la contexture	72
2.3.3.2	Influence de la direction de sollicitation	73
2.3.3.3	Influence de la nature de fibre	74
2.3.4	Conclusion intermédiaire	74
2.4	Optimisation de la contexture jersey	76
2.4.1	Contextures tricotées	76
2.4.1.1	Description des contextures	76
2.4.1.2	Caractéristiques des éprouvettes	76

2.4.2	Comportement en traction des tricotés jersey chargés	79
2.4.2.1	Influence des fils flottés sur la déformabilité structurale de la maille	80
2.4.2.2	Influence sur la tenue mécanique	83
2.4.3	Conclusion sur l'influence de fils flottés sur le comportement des tricotés secs	86
2.4.4	Comparaison du comportement des tricotés jersey et jersey chargé avec un tissu satin	87
2.5	Conclusion du chapitre	87
3	Étude du comportement des composites à renfort tricoté	89
3.1	Élaboration des plaques	91
3.1.1	Les constituants	91
3.1.1.1	La matrice	91
3.1.1.2	Les renforts tricotés	92
3.1.2	Mise en œuvre des composites par injection de résine	92
3.1.2.1	Principe du procédé et paramètres de mise en œuvre	92
3.1.2.2	Procédure de mise en œuvre utilisée	94
3.1.3	Plaques fabriquées et éprouvettes	96
3.1.3.1	Santé-matière des plaques fabriquées	96
3.2	Essais de traction uni axiale	97
3.2.1	Essais et instrumentation	97
3.2.2	Exploitation des résultats	98
3.2.3	Mesure des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images	100
3.2.3.1	Principe de la stéréo-corrélation d'images numériques	100
3.2.3.2	Matériel utilisé	100
3.3	Comportement des composites à renfort tricoté simple	101
3.3.1	Analyse des résultats	102
3.3.1.1	Influence de la nature de la fibre sur les propriétés du composite	105
3.3.1.2	Propriétés des composites selon la direction de sollicitation	107
3.3.1.3	Influence de la texture du renfort sur les propriétés du composite	109
3.3.1.4	Synthèse de l'analyse des courbes de comportement	109
3.3.2	Suivi et hétérogénéité des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images numériques	109
3.3.2.1	Distribution des champs de déformation sur un composite à renfort jersey	111
3.3.2.2	Distribution des champs de déformation longitudinale sur un composite à renfort côte	115
3.3.2.3	Conclusion sur les mesures de champs de déformation	118
3.3.3	Observation des faciès de rupture	118
3.3.3.1	Endommagement des composites à renfort jersey	118
3.3.3.2	Endommagement des composites à renfort côte	121
3.3.3.3	Conclusion sur les observations des faciès de rupture des composites	125
3.3.4	Conclusion sur le comportement des composites à renfort tricoté simple	125
3.4	Influence des fils flottés sur le comportement du composite	125

3.4.1	Analyse des résultats	126
3.4.1.1	Influence de la contexture sur les propriétés mécaniques des composites	128
3.4.1.2	Influence de la contexture sur les propriétés mécaniques des composites sollicités à 0°	128
3.4.1.3	Influence de la contexture sur les propriétés mécaniques des composites sollicités à 45°	130
3.4.1.4	Influence de la contexture sur les propriétés mécaniques des composites sollicités à 90°	130
3.4.1.5	Influence de la nature de la fibre sur le comportement des composites à renforts JC	130
3.4.1.6	Impact des fils flottés sur l'anisotropie des composites	131
3.4.2	Mesures des champs de déformation par stéréo corrélation d'images numériques	134
3.4.2.1	Distribution des champs de déformation pour un composite à renfort JC1	134
3.4.2.2	Distribution des champs de déformation pour un composite à renfort JC2	138
3.4.2.3	Distribution des champs de déformation pour un composite à renfort JC3	138
3.4.2.4	Conclusion sur les mesures de champs de déformation	141
3.4.3	Endommagement des composites à renfort JC	141
3.4.3.1	Endommagement des composites à renfort JC1	141
3.4.3.2	Endommagement des composites à renfort JC2	142
3.4.3.3	Endommagement des composites à renfort JC3	146
3.4.3.4	Conclusion sur les observations des faciès de rupture des composites à renfort JC	148
3.5	Conclusion du chapitre	148
4	Modélisation du comportement en traction des textiles tricotés et des composites résultants	151
4.1	Présentation générale et objectifs du modèle	153
4.2	Modélisation du comportement structural en traction d'un tricot jersey sec	154
4.2.1	Analyse théorique basée sur la théorie de l'élasticité	154
4.2.1.1	Hypothèses du modèle	154
4.2.1.2	Relations géométriques	154
4.2.1.3	Équilibre statique du quart de maille	156
4.2.1.4	Analyse basée sur la théorie de l'élasticité	157
4.2.1.5	Équations décrivant la configuration de la maille et calcul des efforts appliqués	159
4.2.2	Mise en œuvre numérique	160
4.2.2.1	Fonctionnement général du modèle	160
4.2.2.2	Résolution numérique du système	160
4.2.2.3	Initialisation	161
4.2.2.4	Traction colonne sans évolution du diamètre de mèche	161
4.2.2.5	Traction colonne avec évolution du diamètre de mèche	164
4.2.2.6	Traction rangée	169

4.2.2.7	Calcul des courbes de comportement :	171
4.2.2.8	Représentation géométrique de la maille	172
4.2.3	Résultats et comparaisons avec l'expérience	173
4.2.3.1	Initialisation	173
4.2.3.2	Traction colonne	174
4.2.3.3	Traction rangée	180
4.3	Modélisation des propriétés élastiques d'un composite à renfort tricoté	186
4.3.1	Cellule élémentaire représentative et modélisation géométrique du renfort	186
4.3.1.1	Cas du composite à renfort jersey simple :	186
4.3.1.2	Cas du composite à renfort jersey chargé :	187
4.3.2	Modèle analytique pour l'estimation des propriétés élastiques	191
4.3.2.1	Estimation des propriétés élastiques d'une mèche de fibres imprégnées :	192
4.3.2.2	Estimation des propriétés élastique de la combinaison de l'ensemble des mèches présentent dans la CER	195
4.3.2.3	Estimation des propriétés élastique du composite	195
4.3.3	Résultats	196
4.3.3.1	Comparaison avec l'expérience et limites du modèle	196
4.3.3.2	Étude de l'influence de la pré-tension du tricot sur les propriétés élastiques	201
4.4	Conclusion intermédiaire	206
Conclusion générale et perspectives		207
Annexes		214
A	Calcul du moment quadratique d'une mèche	215
A.1	Détermination des dimensions de la section de la mèche	215
A.2	Moment quadratique d'un filament :	215
A.3	Moment quadratique de la mèche :	216
A.4	Rigidité en flexion de la mèche :	216
B	Courbes expérimentales de traction sur les tricots secs simples	219
B.1	Traction colonne sur tricots côte en fibres de verre	219
B.2	Traction rangée sur tricots côte en fibres de verre	219
B.3	Traction colonne sur tricots jersey en fibres de verre	220
B.4	Traction rangée sur tricots jersey en fibres de verre	220
B.5	Traction colonne sur tricots côte en fibres de basalte	221
B.6	Traction rangée sur tricots côte en fibres de basalte	221
B.7	Traction colonne sur tricots jersey en fibres de basalte	222
B.8	Traction rangée sur tricots jersey en fibres de basalte	222
B.9	Traction colonne sur tricots côte en fibres de carbone	223
B.10	Traction rangée sur tricots côte en fibres de carbone	223
B.11	Traction colonne sur tricots jersey en fibres de carbone	224
B.12	Traction rangée sur tricots jersey en fibres de carbone	224
C	Courbes expérimentales de traction sur les tricots secs JC	225
C.1	Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre	225
C.2	Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre	226
C.3	Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de basalte . . .	227
C.4	Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de basalte . . .	228

C.5	Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de carbone . .	229
C.6	Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de carbone . . .	230
D	Résultats des mesures de viscosité effectuées sur le mélange de résine <i>SR1710 + SD8822</i>	231
E	Principe de la stéréo-corrélation d'images	233
E.1	La corrélation d'images numériques 2D :	233
E.2	La stéréo-corrélation d'images numériques :	233
E.3	Le calibrage du système stéréoscopique :	235
F	Résultats des essais de traction sur composites renforcés de tricots de contexture simple	237
F.1	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	237
F.2	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	238
F.3	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	239
F.4	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	240
F.5	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	241
F.6	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	242
G	Résultats des essais de traction sur composites renforcés de tricots JC	243
G.1	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	243
G.2	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	244
G.3	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	245
G.4	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	246
G.5	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	247
G.6	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	248
G.7	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	249
G.8	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	250
G.9	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	251
Table des figures		253
Liste des tableaux		263
Bibliographie		265

Nomenclature

Abbreviations

<i>CER</i>	Cellule Élémentaire Représentative
<i>FAR</i>	Facteur d'Augmentation de la Rigidité
<i>JC</i>	Jersey-Flotté-charge
<i>JC1</i>	Jersey-Flotté-3-charge
<i>JC2</i>	Jersey-Flotté-3,3-charge
<i>JC3</i>	Jersey-Flotté-3,3,3-charge
<i>TAT</i>	Textile Aéro Tarn
<i>VER</i>	Volume Élémentaire Représentatif
LCM	Liquid Composite Molding
LRI	Liquid Resin Infusion
RTM	Resin Transfer Molding
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

Lettres grecques

α	Angle entre la tangente à la maille en B et l'axe OX	<i>rad</i>
β	Angle entre la tangente à la maille en B et l'axe OX	<i>rad</i>
ϵ	Déformation conventionnelle	mm/mm
ϵ_c	Déformation au blocage des mailles	
ϵ_L	Déformation longitudinale	mm/mm
ϵ_T	Déformation transverse	mm/mm
γ	Angle entre la direction de l'effort P et l'axe OX	<i>rad</i>
ν	Coefficient de Poisson	
ρ_r	Densité volumique de la résine	$g.m^{-3}$
ρ_f	densité volumique de la fibre	$kg.m^{-3}$
σ	Contrainte de traction	<i>MPa</i>

Lettres latines

B	Rigidité en flexion de la mèche	$N.mm^2$
b	Largeur de la maille	mm
d_f	Diamètre de la fibre	
D_l	densité linéaire de la mèche	tex
d_m	diamètre de la mèche	m
E	Module d'Young	GPa
e	Épaisseur du tricot	mm
$E(\epsilon_i, \phi_i)$	Intégrale elliptique de seconde espèce	mm
E_f	Module d'Young de la fibre	GPa
E_m	Module d'Young de la matrice	GPa
e_c	Épaisseur de la plaque composite	m
F	Charge appliquée	N
$F(\epsilon_i, \phi_i)$	Intégrale elliptique de première espèce	mm
F_r	Effort à la rupture des tricots secs	N
G	Module de cisaillement	GPa
h	Hauteur de la maille	mm
H_{ep}	Hauteur de l'éprouvette	mm
I_{GZ}	Moment quadratique de la mèche	m^4
L_C	Longueur de la charge	mm
L_F	Longueur du flotté	mm
L_f	Longueur de fil par maille	m
L_{ep}	Largeur de l'éprouvette	mm
L_{FC}	Longueur du flotté + de la charge	mm
m_T	Masse du tricot	kg
m_{ep}	Masse de l'éprouvette	g
m_f	Masse de fibres dans l'éprouvette	g
m_r	Masse de résine dans l'éprouvette	g
ms_{tricot}	Masse surfacique du tricot	$g.m^2$
N_f	Nombre de fibres dans une mèche	
n_{pli}	Nombre de couches de renfort dans le composite	
P	Effort appliqué au tronçon de maille AB	N
$p(\%)$	taux de porosité	$\%$

R	Effort de réaction entre les mailles adjacentes	N
S_0	Section de l'éprouvette de traction à l'état initial	mm^2
S_f	Surface totale occupée par les fibres dans section de la mèche	m^2
S_m	Section de la mèche	m^2
S_{AB}	Longueur de fil entre les points A et B de la maille	mm
S_{BC}	Longueur de fil entre les points B et C de la maille	mm
V_{fm}	Taux de fibres dans la mèche	%
Vol_f	Volume de fibres dans le composite	m^3
Vol_r	Volume de résine dans le composite	m^3
Vol_{ep}	Volume de l'éprouvette	m^3

Introduction générale

Les matériaux composites à matrice organique et renforts fibreux sont actuellement largement employés dans le secteur industriel du fait de leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées et leur utilisation est sans cesse croissante dans des domaines d'applications très variés. Ces matériaux possèdent l'avantage de couvrir une large échelle de propriétés mécaniques et physiques en raison de la grande variété de paramètres qui entrent en compte dans leur élaboration. Ces paramètres, liés aux procédés de fabrication, aux propriétés des différents matériaux qui les composent et pour une grande part à la manière dont ils sont assemblés, permettent de concevoir un matériau optimisé pour l'application désirée. La disposition des fibres dans la matrice a un impact élevé sur les caractéristiques mécaniques du composite, cependant la forme de la pièce désirée peut limiter le choix de l'architecture du renfort pour des raisons par exemple de faisabilité, de performances ou économiques. Jusqu'à maintenant l'industrie s'est majoritairement intéressée aux composites à renforts unidirectionnels et tissés qui présentent d'excellentes propriétés mécaniques dans les directions des alignements des fibres. Cependant, malgré de nombreuses recherches, certains inconvénients subsistent dans l'utilisation de ce types de composites et particulièrement pour la fabrication de pièces de formes complexes. L'architecture du renfort ne permettant pas d'élaborer les pièces directement à la forme désirée, celles-ci nécessitent d'être découpées et assemblées manuellement, ce qui engendre de la perte de matière et des coûts de mise en œuvre élevés. Ce processus a aussi pour conséquence une fragilisation locale des pièces au niveau des assemblages et souvent attribuée à une discontinuité des renforts. Une solution à ce problème est de concevoir de nouvelles architectures de renfort. Les renforts tricotés semblent répondre en partie à ces exigences liées à la mise en forme. Des études ont mis en avant la faisabilité de pièces composites à renforts tricotés de formes complexes. La technologie de tricotage permet d'élaborer des textiles directement à la forme de la pièce finale et l'architecture de ces textiles, obtenus par l'entrelacement de boucles de mèches fibreuses, leur confère une excellente drapabilité. En revanche, l'organisation non alignée des fibres dans le composite engendre des propriétés mécaniques dans le plan réduites. Le procédé de tricotage a pour avantage de pouvoir réaliser une multitude de contextures différentes permettant ainsi de modifier les caractéristiques du renfort ainsi que les propriétés du composite.

Les travaux de recherche s'inscrivent dans ce contexte et visent à contribuer à l'amélioration des performances mécaniques des composites à renforts tricotés. Cette amélioration doit passer par une optimisation de la contexture du renfort. Pour cela, il est nécessaire de comprendre quels sont les paramètres liés au renfort qui influencent le comportement de ces matériaux.

L'objectif de la thèse vise à comprendre le comportement mécanique des matériaux compo-

sites à renforts tricotés et le relier avec les caractéristiques et le comportement de la contexture. L'influence de la nature de la fibre est abordée à travers trois natures de matériaux différentes : le verre, le basalte et le carbone. L'étude porte dans un premier temps sur deux contextures tricotées de référence, la côte et le jersey et dans un second temps, sur une contexture jersey modifiée par insertion de mèches non tricotées dans sa largeur.

Le manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

Le **chapitre 1** constitue une synthèse bibliographique. Une description détaillée des textiles tricotés et du procédé de tricotage met en évidence l'intérêt de cette technologie pour la mise en œuvre de renforts de composites et permet de définir les paramètres caractéristiques des tricots. Un état de l'art sur les études expérimentales du comportement mécanique des renforts secs et des composites soulignent l'intérêt des tricots pour le renforcement de pièces composites de formes complexes et montre que les propriétés mécaniques du composite, limitées dans le plan, varient avec les caractéristiques du tricot. Une synthèse des modèles analytiques et numériques de prédiction du comportement des textiles tricotés et des propriétés élastiques du composite est proposée en dernier lieu.

Le **chapitre 2** est consacré à l'étude expérimentale du comportement en traction uniaxiale des textiles tricotés techniques sollicités dans leurs directions principales : la colonne et la rangée. L'étude, consacrée dans un premier temps aux tricots simples (côte et jersey) élaborés à partir des trois natures de fibres, permet d'identifier les phases successives du comportement et de déterminer les paramètres qui entrent en jeu dans chacune d'elles. Cette étude constitue une base permettant d'expliquer dans un second temps, l'influence de l'insertion de mèches non tricotées dans la largeur du tricot. L'effet de l'ajout d'un nombre croissant de fils "flottés" par rangée de tricot est étudié pour les trois natures de fibres.

Le **chapitre 3** traite du comportement mécanique des composites élaborés par injection de résine et renforcés des contextures étudiées dans le chapitre précédent. Les composites fabriqués sont soumis à des essais de traction longitudinale dans trois directions du renfort. La stéréo-corrélation d'images est utilisée pour suivre l'évolution des champs de déformation sur la surface des éprouvettes et le mode d'endommagement est étudié par l'observation des faciès de rupture. De la même manière que dans le deuxième chapitre, l'étude du comportement des matériaux est divisée en deux parties : dans un premier temps, l'influence de l'architecture du renfort est étudiée à travers les contextures de référence (le jersey et la côte) et, dans un second temps, l'étude se consacre à l'effet de la présence de mèches insérées dans la rangée du tricot jersey sur le comportement du composite.

Dans le **chapitre 4**, un modèle analytique de prédiction du comportement structural des tricots jersey et des propriétés élastiques du composite en fonction de la géométrie du renfort est proposé. Dans un premier temps, le comportement structural du tricot jersey est décrit à travers un modèle basé sur la théorie de l'élasticité. Ce modèle permet de calculer les coordonnées de la fibre neutre de la maille à chaque niveau de déformation. La géométrie issue de ce modèle est utilisée pour alimenter un modèle de prédiction des propriétés élastiques du composite basé sur le principe d'homogénéisation, à partir de la définition d'une cellule élémentaire du tricot jersey avec ou sans fils "flottés".

Chapitre 1

Étude bibliographique

Sommaire

1.1	Une introduction aux matériaux composites à matrice organique	5
1.1.1	Généralités sur les matériaux composites	5
1.1.2	Composites à matrice organique : les constituants	6
1.1.3	Composites à matrice organique : La mise en œuvre	10
1.2	Les textiles tricotés	12
1.2.1	Mise en œuvre d'un tricot	12
1.2.2	Les tricots à mailles cueillies	14
1.2.3	Les caractéristiques des tricots	17
1.3	Intérêt des textiles tricotés pour la mise en œuvre de composites	21
1.3.1	Préformes de formes complexes	21
1.3.2	Déformabilité des textiles tricotés	21
1.3.3	Intégration dans les procédés de mise en œuvre	23
1.4	Propriétés mécaniques des composites à renforts tricotés	24
1.4.1	Comportement en traction	24
1.4.2	Comportement en compression	28
1.4.3	Tenue à l'impact	29
1.5	Modélisation des textiles tricotés et de leur comportement . . .	31
1.5.1	Modélisation géométrique de la maille	31
1.5.2	Modélisation mécanique de la maille	32
1.5.3	Modélisation du comportement de textiles tricotés	33
1.6	Modélisation des propriétés élastiques des composites à renforts tricotés	35
1.6.1	Démarche adoptée dans la modélisation des composites à renforts tricotés	35
1.6.2	Approche théorique du comportement élastique d'un composite unidirectionnel	36
1.6.3	Comportement élastique d'un composite à renfort tricoté	40
1.7	Conclusion du chapitre	46

Ce chapitre propose une étude bibliographique complète dédiée aux matériaux composites à renforts tricotés. Après une présentation générale des composites à matrice organique, une description détaillée du procédé d'élaboration des textiles tricotés et des caractéristiques qui en découlent est réalisée. La suite du chapitre se concentre sur leur utilisation en tant que renfort de composite. Un état de l'art des études expérimentales est proposé. Ces études concernent d'une part, le comportement des tricotés techniques et leur intégration dans les procédés de mise en œuvre et d'autre part, le comportement mécanique des composites résultants. En dernier lieu, une synthèse des modélisations du comportement du tricot sec et des propriétés élastiques du composite est donnée.

1.1 Une introduction aux matériaux composites à matrice organique

1.1.1 Généralités sur les matériaux composites

1.1.1.1 Définition et description générale

Par définition, un matériau composite est constitué d'au moins deux matériaux non miscibles qui ensemble forment un matériau hétérogène dont les propriétés finales sont supérieures à celles de chacun des constituants pris séparément. Ils sont généralement formés :

- d'une ossature, appelée **renfort**, de forme filamenteuse ou particulière qui assure la tenue mécanique du matériau,
- d'un liant, appelé **matrice**, en phase continue qui donne la forme au matériau et permet le transfert des efforts au renfort.

Les propriétés du matériau obtenu résultent [1] :

- des propriétés de chacun des constituants,
- de leur distribution géométrique (taux de renforcement, orientation des fibres...),
- de leurs interactions.

1.1.1.2 Classification des matériaux composites

Il existe une grande variété de matériaux composites qui peuvent être classés selon trois grandes familles :

- les Composites à Matrice Organique (CMO) se composent d'une résine de polymères renforcée de fibres minérales, organiques ou métalliques. Employés dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, les sports et loisir, ils sont souvent utilisés en remplacement des matériaux métalliques pour leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées.
- les Composites à Matrice Métallique (CMM) se composent généralement d'alliages d'aluminium, de magnésium ou de titane renforcés de fibres minérales (carbone, carbure de silicium, bore) ou métalliques. Ils présentent une meilleure tenue mécanique et en température que les composites à matrice organique, mais leur fabrication reste complexe et coûteuse et leur densité est plus élevée. Ils sont principalement employés dans les domaines aéronautiques et automobile.
- les Composites à Matrice Céramique (CMC) : béton, composite carbone/carbone, composite céramique à matrice et renfort céramiques. Ils sont employés dans des applications à très haute température.

1.1.2 Composites à matrice organique : les constituants

Les composites à matrice organique représentent la majeure partie des composites actuellement sur le marché. Ils se composent d'une matrice de polymères et d'un renfort fibreux. Leurs domaines d'applications sont très variés : aéronautique, automobile, naval, sport... Ils ont pour principal avantage d'allier des propriétés mécaniques intéressantes avec une faible densité et sont employés en remplacement de matériaux métalliques pour alléger les structures.

1.1.2.1 La matrice

La matrice, polymères en phase continue, sert de liant, joue un rôle physico-chimique et thermique (protection des renforts, répartition des contraintes et transmissions de celles-ci aux renforts par l'intermédiaire de l'interface fibre/matrice). Elle commande les conditions de mise en œuvre [2]. La matrice doit présenter une bonne compatibilité avec les fibres et avoir une faible masse volumique de manière à conserver au matériau composite des propriétés mécaniques spécifiques élevées [1]. Elle est constituée d'une résine de polymères à laquelle sont ajoutés des charges et adjuvants. L'ensemble se comporte comme un matériau homogène. Les résines se classent en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

1.1.2.1.1 Les résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques sont des polymères à réseau macromoléculaire linéaire. Solides à température ambiante, elles sont mises en forme à l'état fondu par élévation de température sans modification chimique et durcissent en se refroidissant. Elles présentent la principale caractéristique de pouvoir être mises en œuvre plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons par exemple : le polypropylène (PP), polyamide (PA), polycarbonate (PC), polystyrène (PS), polyéthylène (PE), polyétheréthercétone (PEEK) et le polyétherimide (PEI). L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant de la matière première disponible et des procédés de fabrication [1]. Ils ont l'avantage d'avoir une meilleure tenue à l'impact et en fatigue que les thermodurcissables, de se conserver facilement sous forme de semi-produits, de pouvoir être réparés par liaison soudage et d'être recyclés [2]. Les composites à matrice thermoplastique à fibres longues sont actuellement en phase de développement pour des applications structurales.

1.1.2.1.2 Les résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont généralement liquides à température ambiante, favorisant l'imprégnation des fibres. Par apport de chaleur et en présence de catalyseur, la polymérisation conduit à un réseau tridimensionnel de manière irréversible. Il existe plusieurs familles de résines thermodurcissables. Nous citons ici les plus utilisées [2] :

- Les résines polyesters insaturées couvrent la majorité des applications composites. Elles sont utilisées pour des applications grandes diffusions et présentent un bon compromis coût/performance.
- Les résines époxydes sont les plus utilisés après les polyesters. Elles présentent de meilleures performances mécaniques ainsi qu'une meilleure tenue en température, cependant leur coût est plus élevé, leur temps de polymérisation est long et leur mise en œuvre demande des précautions. Elles sont donc généralement utilisées pour des applications structurales dans les domaines tels que l'aéronautique, l'espace ou le militaire.

- Les résines vinylesters sont chimiquement proches des polyesters insaturés mais présentent un coût plus élevé justifié par une très bonne tenue à la corrosion.
- Les résines phénoliques, qui sont des résines de condensation, présentent une bonne tenue aux hautes températures et aux agents chimiques mais nécessitent une mise en œuvre sous pression et donc une faible cadence de production.

1.1.2.1.3 Les charges et adjuvants :

Des charges et adjuvants sont ajoutés aux résines avant polymérisation pour modifier leurs propriétés. Les charges ont pour rôle de modifier les propriétés mécaniques, physico-chimiques, électriques et également de réduire les coûts de la résine. Les adjuvants interviennent dans la phase de mise en œuvre et de polymérisation. Les accélérateurs et catalyseurs ont pour rôle d'initier et d'accélérer la réaction et les durcisseurs interviennent comme agents de réticulation.

1.1.2.2 Le renfort fibreux

Le renfort confère au matériau composite ses propriétés mécaniques. Selon l'application et les propriétés recherchées de la pièce finale, les fibres peuvent être de différentes natures et se présenter sous différentes architectures.

1.1.2.2.1 Les natures de fibres

Il existe une très grande variété de types de fibres organiques et inorganiques (Figure 1.1). Dans la suite du paragraphe les principales fibres actuellement utilisées en renforcement de composites organiques (fibre de verre, de carbone, d'aramide) ainsi que les fibres de basalte, qui sont actuellement en émergence sont présentées. Le tableau 1.1 donne les principales propriétés des fibres énumérées ici.

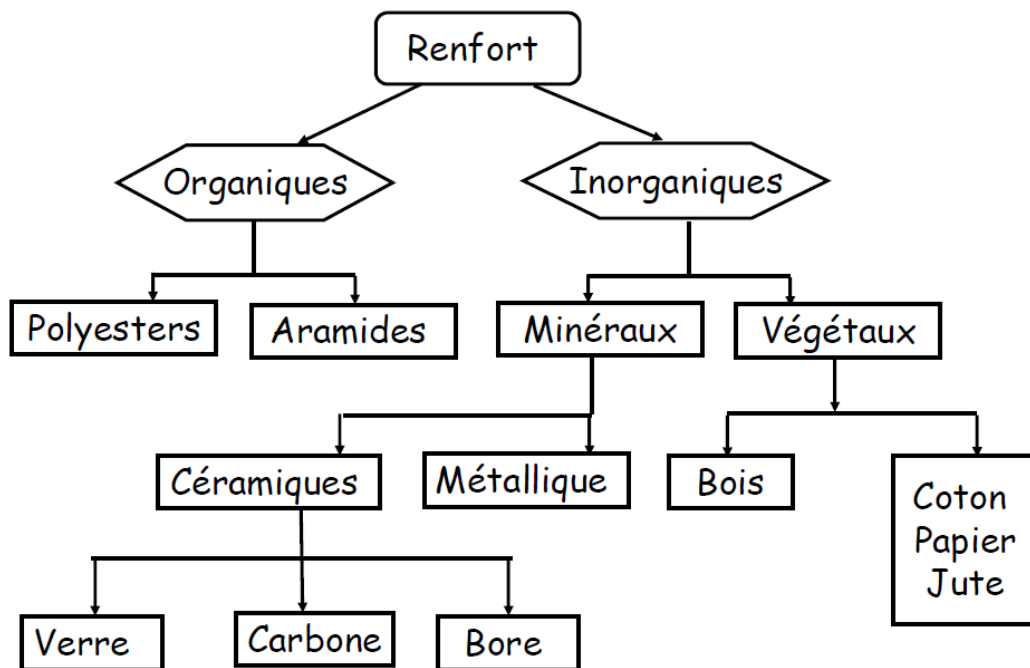


Figure 1.1 – Classification des natures de fibre [3]

- Fibres de verre : Ce sont les premières fibres utilisées dans les composites et les plus courantes du fait d'un excellent rapport qualité/prix. La fibre de verre est obtenue par coulée du verre en fusion (1250°C) au travers de filières en alliage de platine et par étirages successifs permettant d'obtenir des filaments de 5 à $24\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre [4]. Les fibres reçoivent un ensimage pendant l'étirage qui a pour rôle de protéger les fibres de l'abrasion, assurer la cohésion entre les fibres et la compatibilité avec la résine. Selon leur composition chimique, on recense différentes variétés de fibres de verre, dont les plus courantes sont le verre E, R et S.
- Fibres de basalte : La fibre de basalte est un matériau minéral, qui se compose de plagioclase, pyroxène, et olivine. Elle est obtenue à partir de la fusion de la roche volcanique, le basalte. Elle est encore peu utilisée en renforcement de composites mais est en voie d'émergence. Elle présente de meilleures propriétés physico-mécaniques que la fibre de verre. Le basalte résiste au feu et possède une large gamme de températures d'utilisation allant $-260/ -200^{\circ}\text{C}$ à $650/800^{\circ}\text{C}$ avec une baisse des propriétés mécaniques à partir de 300°C [5, 6]. D'autre part elles présentent une excellente mouillabilité. Ses propriétés mécaniques sont supérieures à celles de la fibre de verre E, cependant son coût est plus élevé en raison de sa faible diffusion.
- Fibres de carbone : Les fibres de carbone présentent d'excellentes propriétés mécaniques, nettement supérieures à celles des fibres de verres ainsi qu'une faible densité. Cependant leur coût est très élevé. La fibre de carbone est obtenue par pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. On distingue :
 - Les fibres à précurseur rayonne qui ne sont actuellement plus utilisées,
 - les fibres à précurseur brai sont des fibres à haut module mais à résistance en traction limitée. Elles sont difficiles à produire, à manipuler et les producteurs ont de grandes difficultés à obtenir des précurseurs de qualité constante.
 - les fibres à précurseur PAN (PolyAcryloNitrile) bénéficient d'une technique de polymérisation et de filage issue de l'industrie textile et possèdent un plus haut degré de fiabilité en production industrielle. C'est la filière préférentielle de fabrication des fibres de carbone. Ces fibres possèdent une haute ténacité, une grande rigidité et une faible densité.

Les fibres de carbone sont classées selon leurs propriétés en traction. On distingue les fibres :

- UG : d'usage général ($E < 200\text{GPa}$)
- HR : à haute résistance ($200 < E < 250\text{GPa}$)
- IM : à module intermédiaire ($250 < E < 400\text{GPa}$)
- HM : à haut module ($400 < E < 600\text{GPa}$)
- THM : à très haut module ($E > 600\text{GPa}$)

Les fibres les plus usuelles sont les fibres HR et IM.

- Fibres d'aramide : Les fibres d'aramide sont des fibres synthétiques obtenues à partir de polyamide aromatique.
 - Les fibres méta-aramides sont thermiquement et chimiquement stables, et sont utilisées dans des applications d'isolation.
 - Les fibres para-aramides ont des résistances élevées en traction, faibles en compression

et une faible densité. Elles sont utilisées dans des applications aéronautiques, militaires et spatiales.

Fibre	Diamètre (μm)	Densité (g/cm^3)	Résistance à la rupture en traction (GPa)	Allongement à la rupture en traction (%)	Module de Young (GPa)
Verre E	3 – 30	2.54	3400	4.8	73
Verre R	3 – 30	2,48	4400	5,4	86
Verre S	3 – 30	2,45	4600	5,4	87
Basalte	7 – 20	2.70	3000 – 4800	3	85
Aramide bas module	12	1,45	3100	2,0	70
Aramide haut module	12	1,45	3100	1,0	130
Carbone HR	7	1.78	2800	0.5	200
Carbone HM	7	1.80	2200	0.8	400

Tableau 1.1 – *Propriétés des fibres*

1.1.2.2.2 Les architectures de renfort

Les caractéristiques du composite dépendent très fortement de la distribution des fibres dans le matériau et donc de l'architecture du renfort. Nous distinguons les fibres courtes des fibres longues. Les fibres courtes sont généralement utilisées pour des petites pièces réalisées par injection sous haute pression, dont les performances mécaniques sont peu élevées. Les fibres longues se présentent sous différentes formes : elles peuvent être disposées aléatoirement dans le composite, ou alors orientées dans une, deux ou trois directions (Figure 1.2). Les préformes textiles sont généralement obtenues à partir de roving qui est un assemblage de filaments continus sous forme de mèche (Figure 1.3).

- Les mats : Le mat se présente sous forme planaire comme un tissu mais l'orientation des fibres est aléatoire. Les fibres sont maintenues ensemble par un liant.
- Les unidirectionnels (UD) : Sous forme de nappes (planes), les fibres sont toutes orientées dans la même direction. Ces fibres ne sont maintenues entre elles que par de minces fils, qui ne servent qu'à la cohésion de l'ensemble. Le composite résultant présente de très bonnes propriétés dans la direction des fibres, cependant son comportement est fortement anisotrope.
- Les tissus : Les fibres sont orientées dans deux directions orthogonales. Les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent pour former le tissu. En variant le mode d'entrecroisement, le tissu obtenu est plus ou moins souple et déformable. Il présente de bonnes propriétés mécaniques dans les directions des fibres.
- Les multiaxiaux : Ils se composent d'un empilement de nappes unidirectionnelles dont chacune est orientée dans une direction différente.
- Les tresses : Elles sont fabriquées à partir d'au moins deux mèches. Le tressage est réalisé par entrelacement des différentes mèches entre elles, tout en créant une direction privilégiée du renfort. Les tressés ont une large flexibilité en conception.

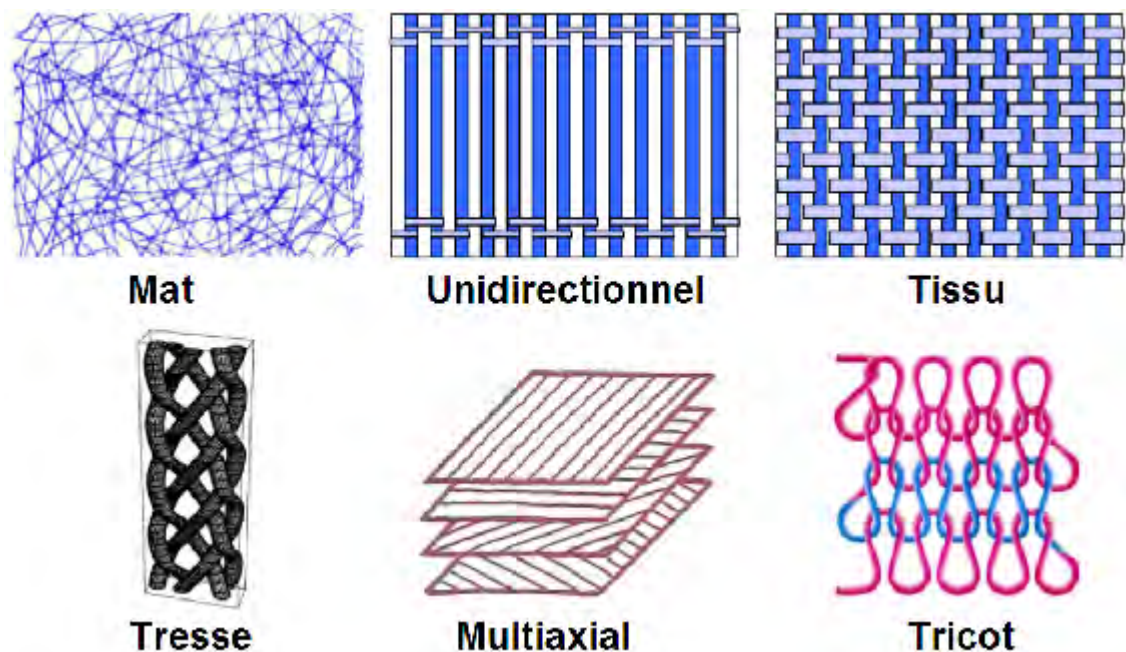


Figure 1.2 – Différentes architectures de renfort

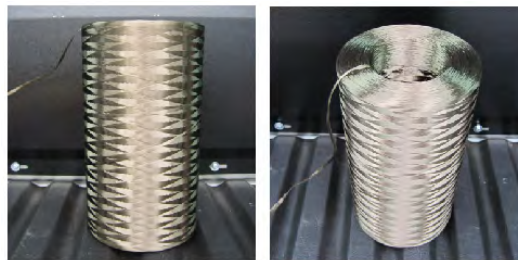


Figure 1.3 – Bobine de roving

- Les tricots : Ils sont fabriqués à partir d'une ou de plusieurs mèches qui s'entrelacent pour former des successions de boucles.

À la figure 1.4 les composites élaborés à partir des différents types de renfort sont classés en fonction de leurs propriétés mécaniques et de mise en œuvre. Les propriétés mécaniques dans le plan des composites à renforts tricotés sont relativement faibles en comparaison avec les composites à fibres longues orientées tels que les renforts tissés, multiaxiaux ou unidirectionnels. Cependant ils présentent ténacité plus élevée et de meilleures propriétés de mise en œuvre.

1.1.3 Composites à matrice organique : La mise en œuvre

Il existe de nombreuses technologies de mise en œuvre des matériaux composites à matrice organique. Le choix du procédé est conditionné par des contraintes d'aspect économique (nombre de pièces à réaliser, investissement, cycles de fabrication) d'une part liées aux matériaux (caractéristiques de mise en œuvre de la résine, architecture du renfort) et d'autre

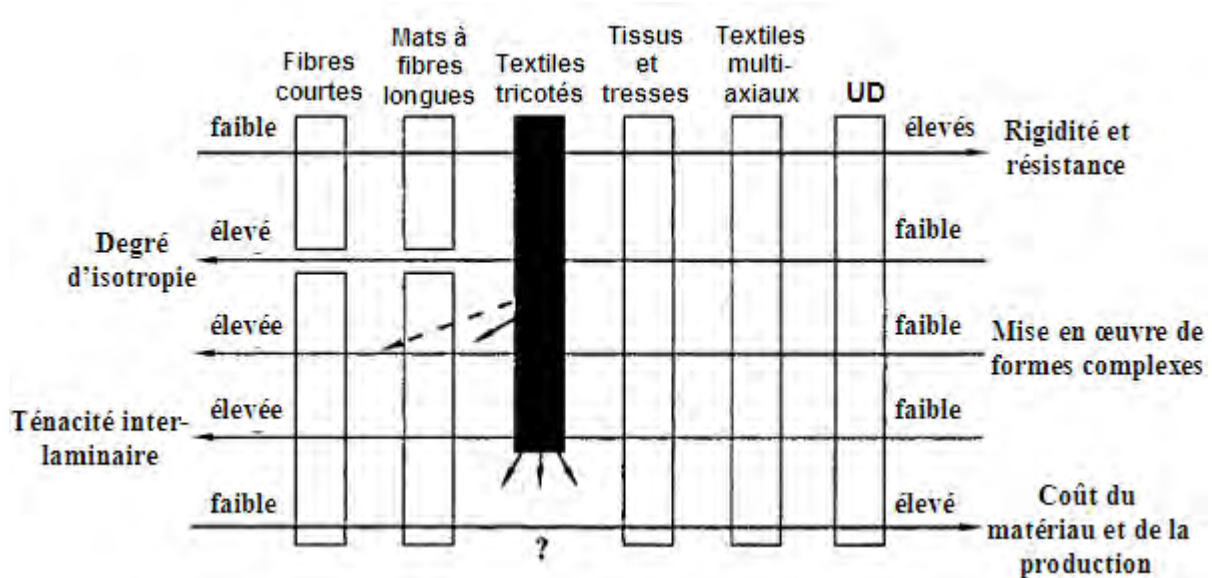


Figure 1.4 – Comparaison des propriétés des composites à différents types de renforts [7]

part aux propriétés recherchées pour le matériaux final (propriétés mécaniques, état de surface, forme et dimensions). Nous présentons ici quelques procédés de la famille des LCM (Liquid Composite Molding) qui regroupe les procédés de type injection et infusion de résine (RTM, VARTM, VARI, LRI...). Ces procédés sont adaptés pour la mise en œuvre de pièces de petites et moyennes tailles pour des moyennes séries.

Le procédé RTM (Resin Transfer Molding) ou moulage par injection de résine est un procédé de mise en forme des composites dans lequel une résine thermodurcissable, à viscosité relativement faible, est injectée à basse pression, à travers un renfort sec placé dans un moule fermé (Figure 1.5). Ses principales étapes sont : le placement du renfort fibreux dans le moule, le remplissage du moule et la polymérisation de la résine. Les avantages de ce procédé résident essentiellement dans la possibilité de mettre en œuvre des pièces de géométrie complexe, de maîtriser l'épaisseur et le taux fibres dans le composite et d'obtenir un bon état de surface.

Le procédé VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) est une variante du RTM. Le principe est le même et le vide est également appliqué aux événements pour faciliter l'imprégnation du renfort par la résine.

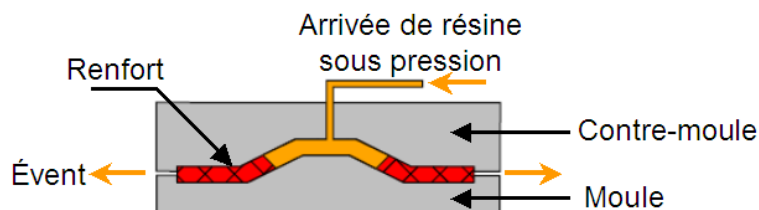


Figure 1.5 – Schémas des procédés RTM et VARTM

Le procédé VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion) est un procédé d'infusion de résine dans lequel le renfort est placé sur un moule rigide tandis que le contre-moule est une membrane souple déformable. La résine est à la pression atmosphérique. L'infusion de résine a lieu à travers le renfort et se fait par le tirage du vide aux événements dans le plan du renfort.

Le procédé LRI (Liquid Resin Infusion) est également un procédé d'infusion dans lequel le renfort est placé sur un moule rigide et où le contre-moule est une membrane souple déformable. Un tissu drainant positionné au dessus de la préforme fibreuse facilite l'imprégnation qui a lieu dans l'épaisseur du renfort (Figure 1.6).

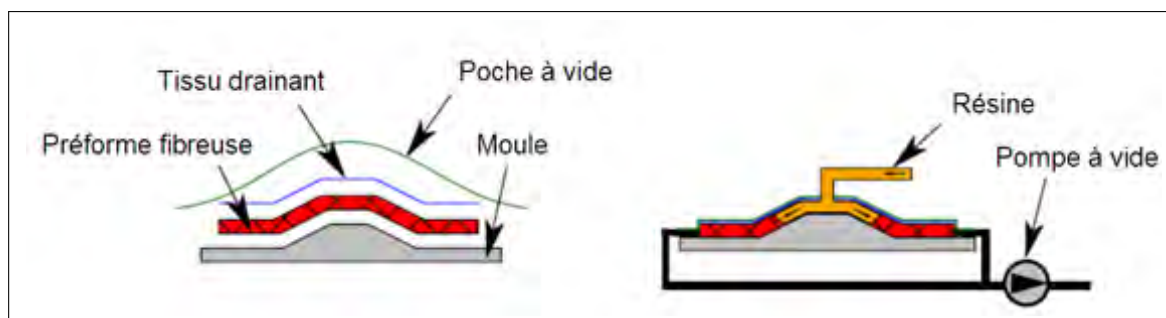


Figure 1.6 – Schémas du procédé LRI

1.2 Les textiles tricotés

1.2.1 Mise en œuvre d'un tricot

Le tricotage est un procédé de mise en œuvre de structures textiles possédant un potentiel d'automatisation élevé. Les tricots, réalisés sur des métiers à partir d'un ou de plusieurs fils, sont constitués de boucles entremêlées les unes dans les autres appelées mailles. La maille est formée par le mouvement alternatif d'une aiguille qui permet de faire passer le fil au travers de la maille précédente. La formation a lieu en trois étapes successives (l'ascension, l'alimentation et l'abattage) décrites dans la figure 1.7.a. L'aiguille est au préalable alimentée par le fil de la maille précédente (1). Lors de l'ascension, l'aiguille monte et permet au fil pris dans le bec de l'aiguille d'ouvrir le clapet et de passer sous celui-ci (2). Une boucle se forme autour de l'aiguille qui se trouve alors au maximum de phase de montée. Lors de l'alimentation, l'aiguille redescend en attrapant de nouveau le fil (3) et la boucle formée précédemment referme le clapet sur le fil qui vient d'être pris par l'aiguille (4). Lors de l'abattage, l'aiguille termine sa course en descendant dans la fonture ce qui permet à la boucle de former une nouvelle maille en retombant de l'aiguille (5). La répétition de ce processus permet de former une chaîne ou colonne de mailles (Figure 1.7.b).

Ce travail, effectué par plusieurs aiguilles disposées côte à côte, permet de réaliser un tricot. Une succession de mailles dans la largeur d'un tricot est appelée rangée et une succession de mailles dans la longueur d'un tricot est appelé colonne. Les mailles des rangées et des colonnes sont inter-connectées pour former le tricot. Selon la direction dans laquelle les boucles sont formées, les tricots sont classés en deux familles : les tricots à mailles cueillies et les tricots à mailles jetées (Figure 1.8).

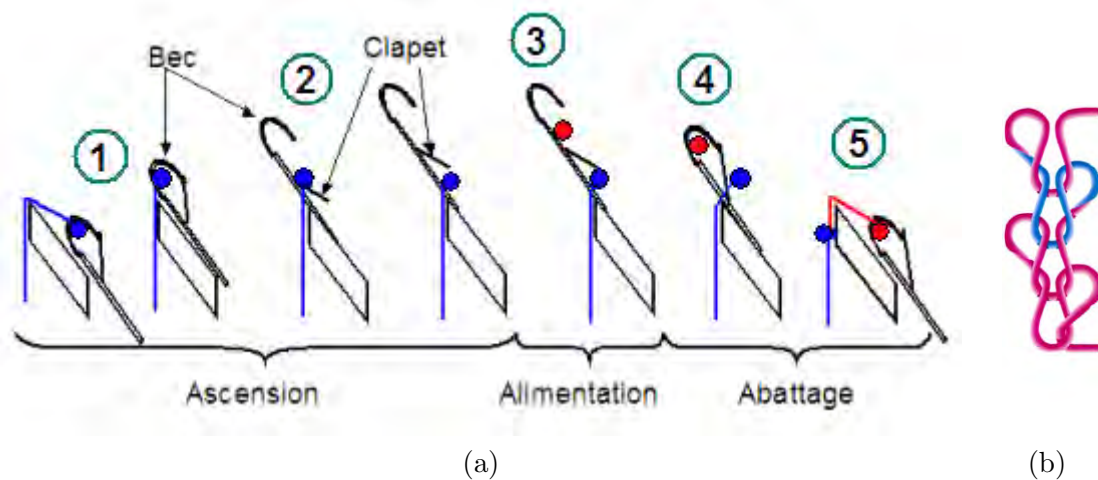


Figure 1.7 – (a) Formation d'une maille et (b) chaîne de mailles

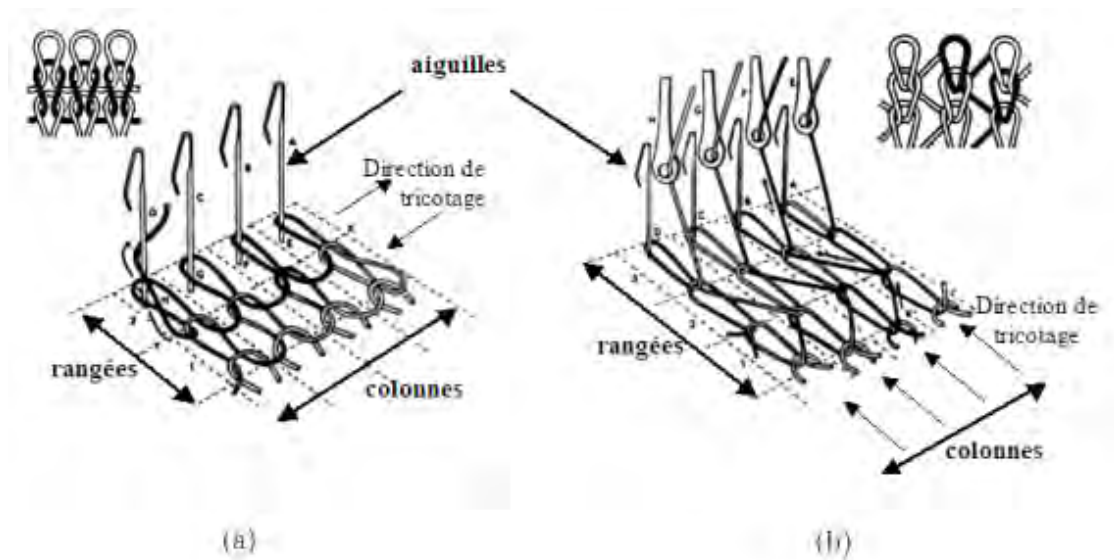


Figure 1.8 – (a) Tricot à mailles cueillies et (b) tricot à mailles jetées

1.2.1.1 Les tricots à mailles cueillies :

Les mailles sont cueillies successivement par chacune des aiguilles sur la largeur du métier à tricoter et à partir d'un même fil d'alimentation (Figure 1.8.a). Chaque aiguille termine son cueillage avant que la suivante ne commence le sien. Une fois la rangée de maille terminée, le tricot est tiré vers le bas et une nouvelle rangée de mailles est réalisée.

1.2.1.2 Les tricots à mailles jetées :

Les mailles sont produites par des aiguilles alimentées individuellement par un fil distinct dans le sens longitudinal du tricot (Figure 1.8.b). Chaque aiguille du métier reçoit un fil et

les mailles d'une même rangée sont produites simultanément. A chaque nouvelle rangée, les fils sont décalés par rapport aux aiguilles de manière à alimenter une aiguille différente de la précédente pour obtenir des colonnes de mailles reliées entre elles.

La suite de l'étude est consacrée aux tricotés à mailles cueillies qui sont l'objet de la thèse.

1.2.2 Les tricotés à mailles cueillies

1.2.2.1 Description du processus de tricotage des tricotés à mailles cueillies

Il existe deux types de métiers à tricoter : les métiers rectilignes et circulaires (Figure 1.9), dont la différence réside dans la disposition des aiguilles, en ligne ou en cercle, mais dont le fonctionnement est identique.

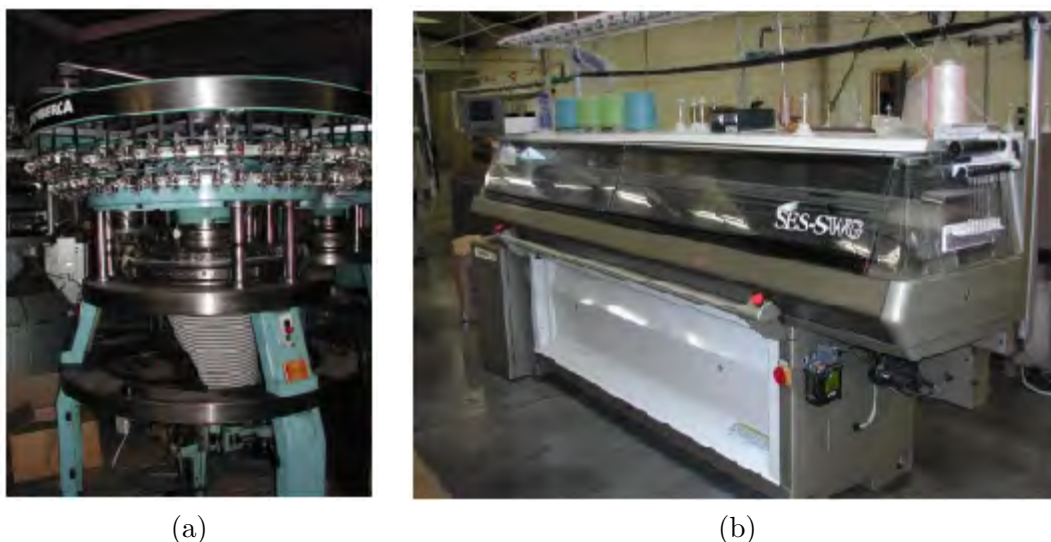


Figure 1.9 – (a) métier circulaire ; (b) métier rectiligne

Nous nous intéressons aux métiers rectilignes, utilisés pour la réalisation des tricotés de notre étude, pour décrire en détail leur fonctionnement. La figure 1.10 présente schématiquement une vue de face et une vue de profil du métier. Il est composé de deux fontures, parties fixes, disposées face à face. Les fontures présentent des rainures dans lesquelles sont positionnées les aiguilles. Chaque aiguille (Figure 1.11.b) est constituée d'un bec, qui permet de cueillir le fil, d'un clapet mobile qui permet la formation des mailles (Figure 1.7), et d'un talon qui permet aux aiguilles d'être actionnées. Le chariot est une partie mobile qui se déplace sur la largeur du métier. Équipé d'un guide-fil et d'un porte-cames, il permet l'alimentation des aiguilles. Le guide-fil amène le fil au dessus des aiguilles, entre les fontures. Les cames maintenues dans le porte-came actionnent successivement chacune des aiguilles en guidant les talons qui émergent des fontures pour leur appliquer le mouvement alternatif d'ascension et de chute nécessaires à la formation de la maille (Figure 1.11.a). Lorsque le chariot termine sa course, la rangée de mailles est formée et le tricot est tiré vers le bas à l'aide des rouleaux, pour réaliser une nouvelle rangée.

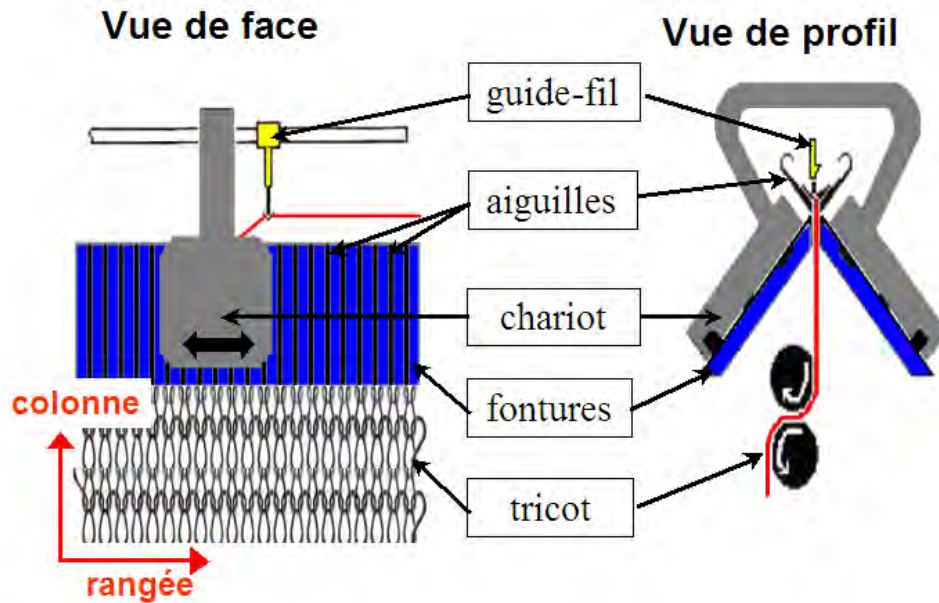


Figure 1.10 – schéma d'un métier rectiligne

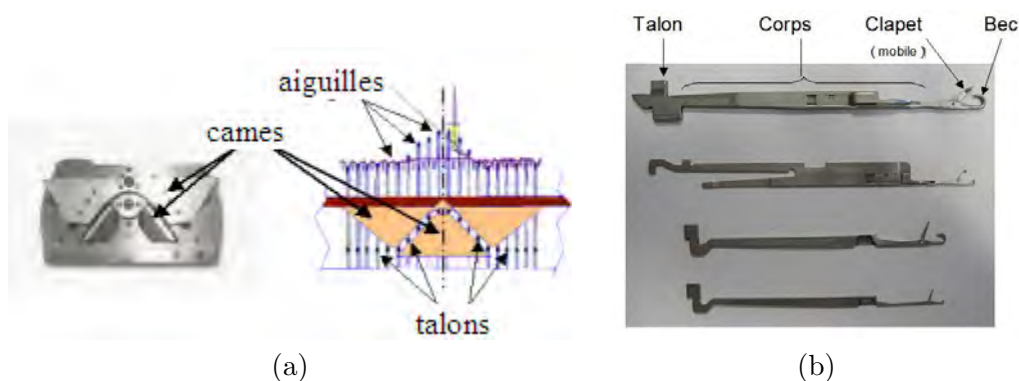


Figure 1.11 – (a) Système d'actionnement des aiguilles; (b) aiguilles

1.2.2.2 Contextures

Le processus décrit précédemment est entièrement automatisé et permet, en programmant des séquences de travail des aiguilles, de réaliser des tricotés de différentes architectures appelées contextures.

La réalisation des contextures dépend de l'action exercée par les aiguilles. On distingue quatre cas différents :

- La maille simple : Elle est formée lorsque l'aiguille monte, attrape le nouveau fil et tire celui-ci au travers de la maille précédente comme décrit dans la section 1.2.1. Dans ce cas l'aiguille réalise entièrement sa course. On distingue différentes parties dans une maille qui sont la tête, les jambes, les pieds, les croisements entre les mailles adjacentes

et la boucle inter-maïlles (Figure 1.12.a).

- La charge : La charge est une accroche de fil au tricot sans former de maille (Figure 1.12.b). Elle est formée lorsque l’aiguille ne monte pas au maximum de sa course. Elle attrape le nouveau fil mais la boucle précédente ne peut pas descendre en-dessous du clapet et reste dans le crochet. La maille de la rangée précédente et le nouveau fil sont au même moment dans le bec de l’aiguille. Les deux sont abattus à la chute suivante lorsque l’aiguille monte jusqu’au dégagement. Le fil est très peu courbé et lorsque le tricot est tendu, il est presque aligné.
- Le flotté : L’aiguille est hors travail et reste à sa position de départ, elle ne monte pas cueillir le nouveau fil qui flotte à travers une ou plusieurs colonnes du tricot.
- Le transfert de maille : Le transfert consiste à reporter une maille d’une aiguille à une autre aiguille de la même fonture ou bien de la fonture opposée.

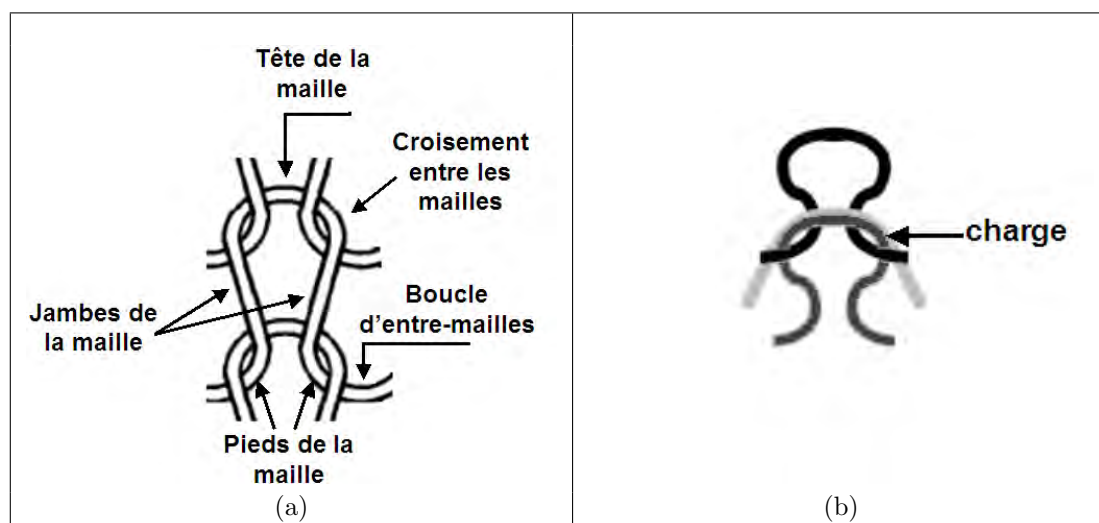


Figure 1.12 – (a) maille simple ; (b) charge

La figure 1.13 présente les conventions d’écriture des schémas techniques des tricots qui seront utilisés par la suite. Ces schémas permettent de décrire totalement l’architecture de la contexture.

Nous distinguons les contextures simple et double fontures qui sont obtenus dans le premier cas lorsque les aiguilles disposées sur une seule des deux fontures sont actionnées et dans le deuxième cas, lorsque les aiguilles disposées sur les deux fontures sont actionnées. La figure 1.14 présente le diagramme technique (a), la représentation graphique (b) et 3D (c) des deux contextures simple et double fonture les plus simples : le jersey et la côte. La Cellule Élémentaire Représentative (CER) est le réseau minimal de mèches qui forme le motif géométrique élémentaire décrivant le textile complet [10].

- Jersey (- rythme) : Contexture la plus simple des tricots simple fonture. C’est une structure qui ne propose que des mailles avant ou arrière. Dans le cas où des aiguilles seraient hors travail, on rajoute le rythme. Le rythme s’exprime par deux nombres : le premier est le nombre d’aiguilles travaillant, le second, le nombre d’aiguilles hors travail.
- Côte (- rythme) : Contexture la plus simple des tricots double fonture. Il possède des colonnes de mailles avant et arrière juxtaposées. La côte la plus simple alterne sur une même rangée une maille avant et une maille arrière. Dans le cas d’aiguilles hors travail,

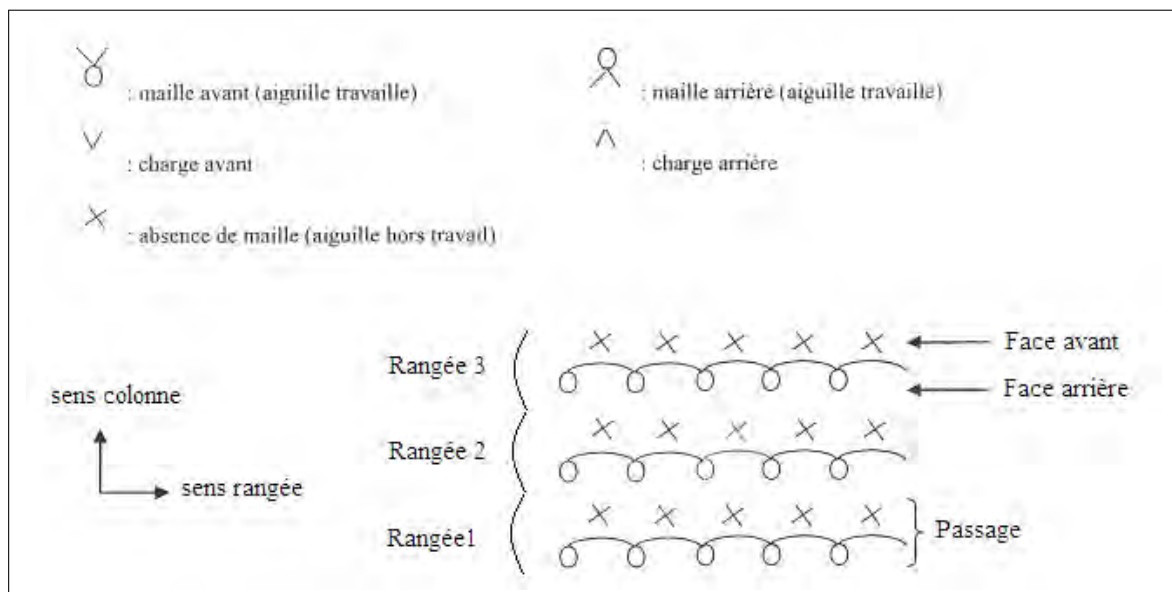


Figure 1.13 – Convention d'écriture des diagrammes techniques des tricotés : exemple pour le tricot à mailles cueillies

on rajoute le rythme qui s'exprime par deux nombres. La structure est très élastique dans le sens rangée, du fait de la partie de fil entre les deux faces qui s'allonge à la traction.

Chaque contexture est constituée d'une base, structure principale du tricot, sur laquelle peuvent se rattacher des structures secondaires. Par convention, le nom d'un tricot est donné de la façon suivante :

[Base - extension 1 - extension 2 ...]

Les extensions donnent des indications sur les structures de base et secondaire. La structure principale du tricot ainsi que les structures secondaires permettent de modifier les propriétés du tricot. Ci-dessous sont présentés deux exemples de contextures.

- [Jersey-Flotté-longueur(-charge)] : Dans ce cas, le jersey constitue la base à laquelle est ajouté un fil flotté très peu relié au tricot. La longueur correspond au nombre d'aiguilles successives non actionnées dans la largeur. On indique "charge" si le liage est réalisé par une charge, dans le cas contraire, le liage se fait par une maille (Figure 1.15). Le flotté permet de brider le tricot.
- Milano : Il s'agit d'une contexture combinant le jersey et la côte. Il est formé de deux rangées de jersey, l'une réalisée sur la fonture avant et l'autre sur la fonture arrière, reliées par une rangée de côte (Figure 1.16).

1.2.3 Les caractéristiques des tricotés

Les principales caractéristiques des tricotés sont :

- La masse surfacique,
- L'épaisseur du tricot,
- La géométrie de la maille.

Ces caractéristiques dépendent des propriétés des mèches et des paramètres de tricotage.

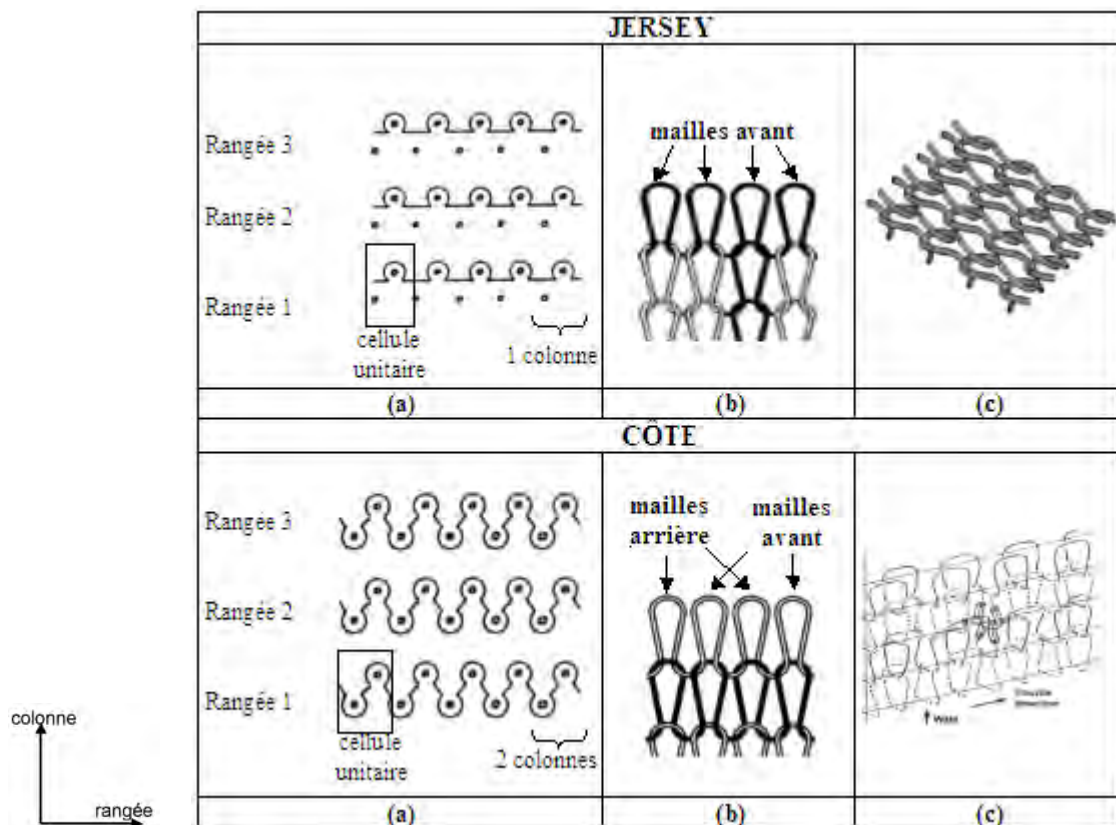


Figure 1.14 – Tricot jersey et côte : (a) diagramme technique, (b) représentation graphique et (c) représentation 3D

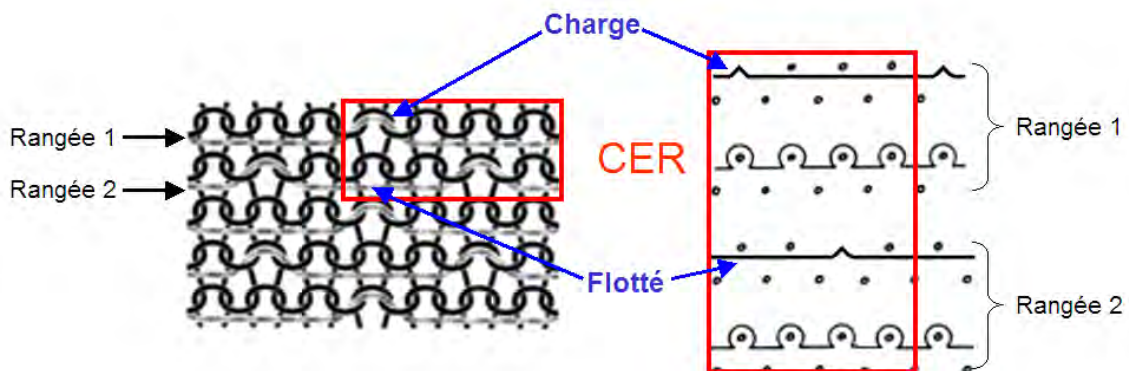


Figure 1.15 – Représentation graphique et vue technique d'un [jersey-flotté-3-Charge]

1.2.3.1 Caractéristiques des mèches

Une mèche est composée de fibres continues dont le nombre N_f varie de quelques centaines à quelques milliers et le diamètre d_f de 5 à 100 μm selon le matériau (Figure 1.17).

La nature du matériau ainsi que le nombre et le diamètre des filaments influent sur les

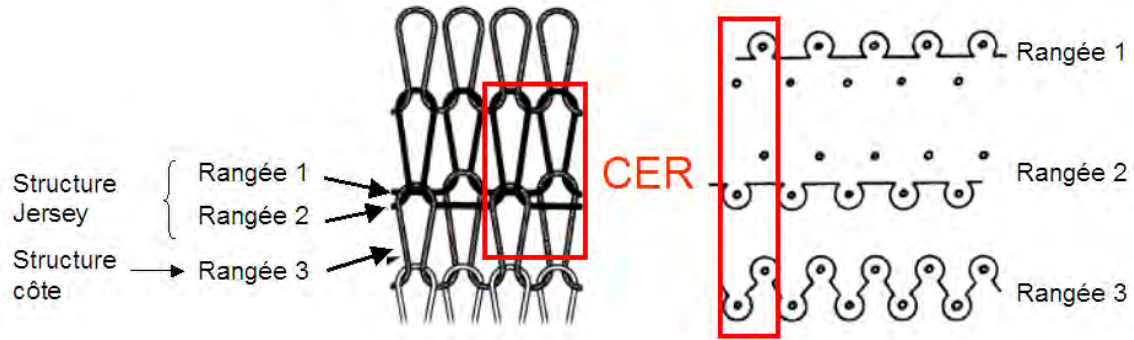


Figure 1.16 – Représentation graphique et vue technique d'un milano

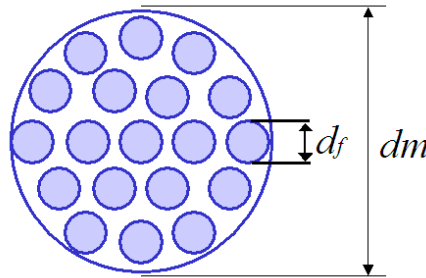


Figure 1.17 – Schématisation d'une mèche fibreuse

caractéristiques des mèches et leurs propriétés mécaniques. Les caractéristiques de la mèche sont :

- La section de la mèche (forme et dimensions) : Elle dépend du nombre et du diamètre des filaments ainsi que de l'arrangement des fibres dans la mèche.
- La densité linéique : Il s'agit de la masse en gramme par kilomètre de fil. Elle s'exprime en *tex*. Elle dépend de la densité du matériau, du diamètre et du nombre de filaments.

1.2.3.1.1 Estimation du diamètre de la mèche :

Dans la majorité des cas, la mèche est considérée comme étant circulaire. Plusieurs auteurs [11, 12] proposent une méthode pour estimer le diamètre de la mèche à partir de la densité linéaire de la mèche, de la densité volumique de la fibre et du coefficient d'occupation des filaments dans la mèche également appelé taux de fibres dans la mèche (V_{fm}).

$$V_{fm} = \frac{S_f}{S_m} \quad (1.1)$$

S_m étant la section totale de la mèche et S_f , l'aire totale occupée par les fibres présentes dans la mèche, obtenue à partir de la densité linéaire de la mèche D_l et la densité volumique de la fibre ρ_f :

$$S_f = \frac{D_l}{\rho_f} \quad (1.2)$$

On obtient alors le diamètre de la mèche d_m à partir des équations 1.1 et 1.2 :

$$d_m = \sqrt{\frac{4D_l \cdot 10^{-3}}{V_{fm}\pi\rho_f}} \quad (1.3)$$

Différentes valeurs de V_{fm} ont été estimées par les auteurs. Hearle et al. considèrent deux types d'arrangements géométriques des fibres dans la mèches [13] et obtiennent des valeurs de 0.75 et de 0.91 selon les arrangements. Ramakrishna et al. [14] ont déterminé ce coefficient expérimentalement et ont trouvé une valeur de 0,45.

1.2.3.1.2 Estimation des caractéristiques mécaniques de la mèche :

Les caractéristiques mécaniques de la mèche sont sa rigidité en flexion et sa raideur en traction. Elles dépendent des caractéristiques de la mèche, c'est à dire le nombre et le diamètre des filaments mais également de la forme de la section et des propriétés mécaniques de la fibre.

La rigidité en flexion (ou module de flexion) est donnée par $E_f I_{GZ}$, où E_f est le module d'Young de la fibre et I_{GZ} , le moment quadratique de la mèche lié au nombre de filaments, à leur section et à l'arrangement des fibres dans la mèche.

La raideur en traction est donnée par :

$$E_f S_f = E_f \times N_f \frac{\pi \times d_f^2}{4} \quad (1.4)$$

1.2.3.2 Paramètres de tricotage

Parmi les paramètres liés au tricotage, le plus important est celui lié à la programmation des séquences de travail des aiguilles qui définissent la contexture. Cependant, à contexture donnée, d'autres paramètres peuvent varier :

- La taille de l'aiguille et du bec,
- la jauge qui correspond au nombre d'aiguilles par unité de longueur dans la largeur du métier,
- la course de l'aiguille, qui correspond à la distance que va parcourir l'aiguille lors de son ascension pour cueillir le fil,
- la tension appliquée au fil,
- la tension appliquée au tricot pendant le rabattage.

1.2.3.3 Influence des paramètres sur les propriétés des tricots

Il est évident que la contexture a un impact important sur les propriétés des tricots telles que sa masse surfacique et son épaisseur ou les dimensions et densités de mailles. À contexture donnée, les caractéristiques de la mèche ainsi que les paramètres de tricotage décrits précédemment ont une influence sur les propriétés du tricot mais sont également inter-dépendants. La densité surfacique est liée à la densité linéique de la mèche d'une part ainsi qu'aux dimensions et densité de mailles. De la même manière, l'épaisseur du tricot est liée à la section de la mèche et aux dimensions de la maille.

Les dimensions de mailles dépendent d'une part des paramètres de tricotage :

- la jauge agit sur l'écartement entre les mailles, et donc la largeur des mailles,
- la course de l'aiguille agit sur la hauteur de la maille,
- la tension appliquée au tricot et au fil agissent sur la longueur de fil et la hauteur de maille.

Les dimensions de la maille sont également liées à la mèche et à son module de flexion qui va jouer sur l'état d'équilibre de la maille. Ce phénomène est décrit plus précisément dans la section 1.5.2. En réalité tous ces paramètres sont liés et ne laissent pas une grande liberté d'action sur la géométrie de la maille. En effet, la taille de bec et donc l'aiguille utilisée dépendent de la section de la mèche. La taille de l'aiguille détermine la jauge utilisée ainsi que la course de l'aiguille et la tension appliquée au tricot dépend du fil utilisé et de son module de flexion pour minimiser son endommagement.

1.3 Intérêt des textiles tricotés pour la mise en œuvre de composites

Les premières sections de ce chapitre ont permis de présenter les matériaux composites à matrice organique d'une part et la technologie de tricotage d'autre part. A présent nous nous intéressons aux matériaux composites à renforts tricotés. De part leur architecture, les textiles tricotés ne sont pas adaptés pour le renforcement de pièces composites fortement structurales nécessitant une haute résistance et rigidité, cependant ils présentent un fort potentiel pour la mise en œuvre de pièces de formes complexes.

1.3.1 Préformes de formes complexes

Dans la précédente section, nous avons mis en évidence la possibilité de réaliser une multitude de textures différentes grâce à un procédé automatisé par programmation de séquences de travail des aiguilles. La technique de transfert de maille présentée à la section 1.2.2.2 permet également de réaliser des préformes de formes complexes et tridimensionnelles, directement à la forme de la pièce finale à partir d'un seul fil. La figure 1.18 présente quelques exemple des formes pouvant être réalisées. Le tricotage permet donc de réaliser rapidement des textiles de forme tubulaire, de dôme, de cône ou bien des raccords et également des préformes trouées sans nécessité de découpe ni d'assemblage. Cette caractéristique est intéressante d'un point de vue économique puisqu'elle permet de minimiser les pertes de matière due à la découpe et de réduire le temps de production et le nombre d'opérations de mise en œuvre liées à l'assemblage. D'un point de vue mécanique, les zones fragilisées par une discontinuité des fibres dans les pièces au niveau des assemblages et par le délaminage lors du perçage sont limitées.

1.3.2 Déformabilité des textiles tricotés

Le comportement des textiles tricotés techniques est essentiellement lié à un effet de structure [15] dû à un changement de forme de la maille. A notre connaissance, il existe peu d'études expérimentales qui concernent le comportement des tricots techniques secs élaborés à partir de fibres minérales. Des recherches ont été menées dans le domaine du textile sur le comportement des tricots destinés à l'habillement, cependant, la communauté des mécaniciens s'est majoritairement intéressée à l'étude des matériaux composites à renforts tricotés. Les études menées ont mis en évidence l'importante déformabilité des tricots par rapport aux

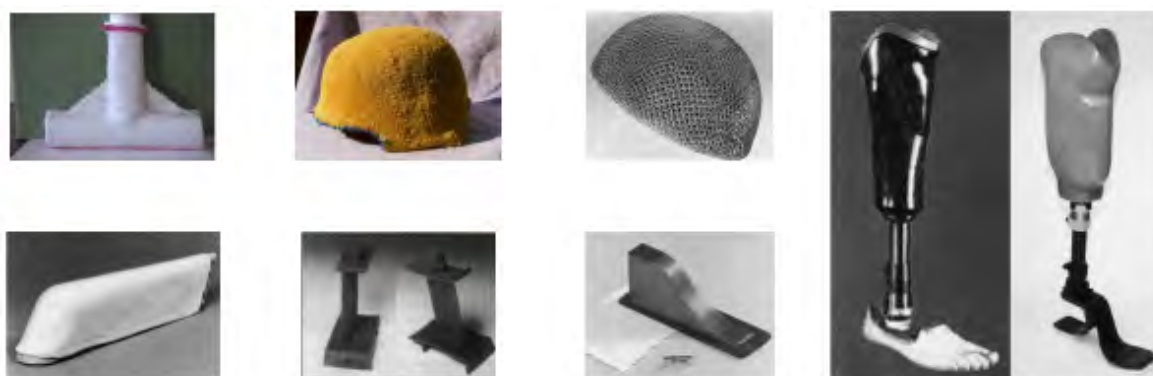


Figure 1.18 – *Exemples de préformes tricotées et de composites à renforts tricotés*

tissus.

Luo et al. [16] ont réalisé des essais de traction biaxiale en appliquant des vitesses de déplacement indépendantes entre la colonne et la rangée sur des tricot côte et milano en fibres de verre. Les niveaux de déformations obtenus avec les tricot côte sont plus importants. Les propriétés des tricotés sont anisotropes, particulièrement pour le tricot côte qui se déforme deux fois plus dans la direction rangée du fait de sa structure spécifique tridimensionnelle. La comparaison avec la déformation d'un tissu satin montre l'incroyable capacité du tricot à se déformer (Figure 1.19.a).

Gommers et al. [17] font référence à des travaux de thèse réalisés au même laboratoire donnant des taux de déformation des tricotés techniques pouvant varier de 10 à 100% en traction selon la contexture choisie et atteignant des angles de cisaillement de 50° sans plis. Rozant et al. [18] ont étudié le comportement de différents textiles tissés et tricotés à base de fibres de verre à travers des essais de traction réalisés dans les directions colonne, rangée et 45°. Ils ont comparé le comportement d'un tissu satin à un tricot à mailles jetées et ont montré que le tricot présente des taux de déformation très importants dans les trois directions de sollicitation allant jusqu'à quasiment 100% de déformation tandis que le tissu satin est très peu déformable dans les direction chaîne et trame (moins de 5% de déformation) et atteignent des angles de cisaillement d'environ 30° avec l'apparition de plis (Figure 1.19.b).

Araújo et al. ont également étudié expérimentalement le comportement en traction de tricotés de différentes contextures basées sur le jersey en fibres de verre [19]. Les résultats montrent que l'introduction de fibres non tricotées dans la rangée du tricot augmente la charge à la rupture et diminue son taux de déformation dans cette direction mais n'a pas d'impact dans la direction colonne.

Le comportement général en traction d'un tricot se déroule en deux grandes étapes successives (Figure 1.20.a). Dans la première étape, une déformation structurale se produit essentiellement par flexion de la mèche. Un allongement des boucles dans la direction de sollicitation est observé se traduisant par une importante déformation sous de faibles charges qui a lieu jusqu'au point d'allongement critique de la maille ou point de blocage des mailles à partir duquel la seconde étape débute avec un transfert des efforts aux fibres. Une déformation physique du matériau se produit alors essentiellement par traction et se traduit par une importante augmentation de la charge et une faible déformation. Duhovic et al. [20] comparent les courbes d'effort déplacement d'un tricot et d'un tissu sollicités en traction en identifiant les

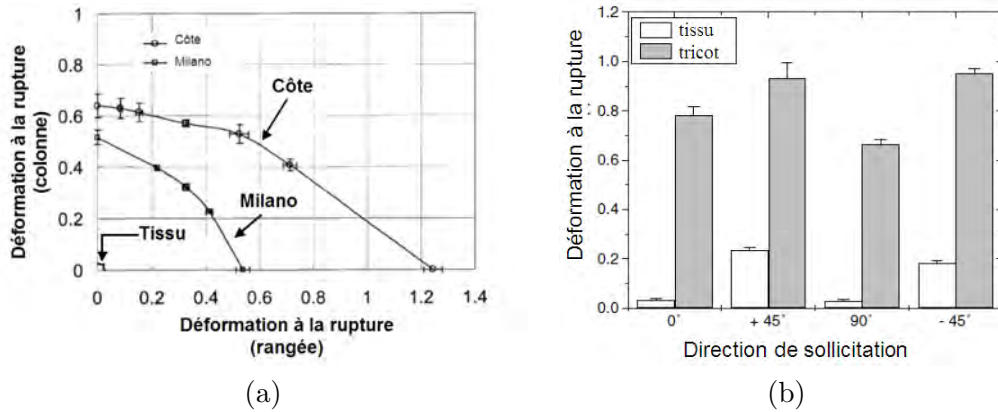


Figure 1.19 – (a) Courbe de déformations à la rupture en traction biaxiale des tricots côte, milano et d'un tissu [16]; (b) Comparaison des déformation à la rupture en traction uniaxiale d'un tricot et d'un tissu [18]

différents modes de déformation successifs. Malgré des déformations beaucoup plus importantes et des efforts plus faibles pour les textiles tricotés, les courbes de comportement suivent les mêmes tendances et les mêmes modes de déformation sont observés (Figure 1.20.b). L'augmentation de l'effort au début des courbes (a) est dû à du frottement entre les fibres. Les zones (b) et (c), la déformation est due à la flexion de la mèche. Pour les textiles tricots cette déformation s'accompagne d'un glissement entre mailles adjacentes (d). Enfin (e) et (f) correspondent à la compression de la mèche et à l'extension des fibres.

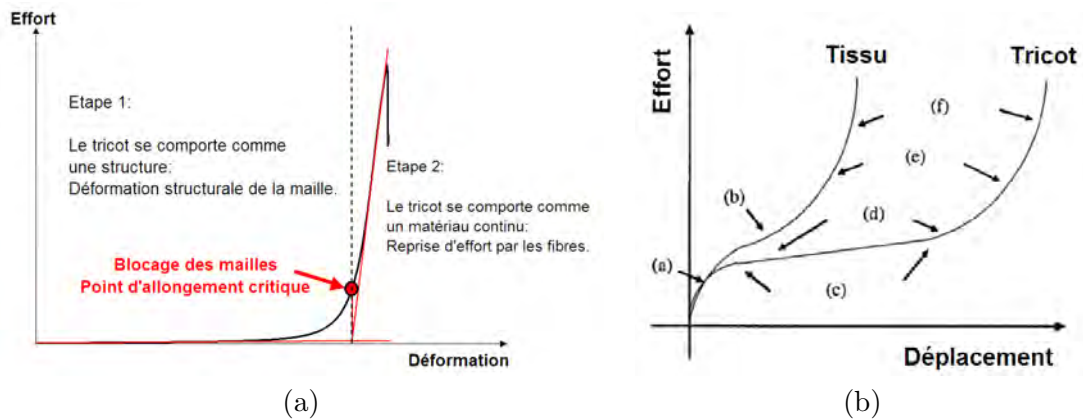


Figure 1.20 – (a) Comportement général d'un tricot sec en traction [21] et (b) Comparaison des comportements en traction d'un tissu et d'un tricot [20]

1.3.3 Intégration dans les procédés de mise en œuvre

L'importante déformabilité structurale des mailles des tricots leur confère d'excellentes propriétés pour la mise en œuvre de composites et notamment avec les procédés de type LCM. Différentes études expérimentales et théoriques ont été consacrées à la drapabilité des

tricotés. Savci et al. [22] se sont intéressés à l'emboutissage des tricotés pour la mise en œuvre de composites par procédé RTM. Ils ont étudié l'influence des propriétés physiques et mécaniques et de la texture sur la simulation de la formabilité. Par la suite, ils se sont intéressés à la formabilité d'une pièce d'hélicoptère par procédé RTM en utilisant différentes textures et ont mis en évidence l'impact des géométries des mailles et de l'architecture du tricot sur la formabilité du composite. La formabilité d'une pièce se définit par la manière dont les fibres sont distribuées dans la pièce finale et par les défauts apparaissant pendant la mise en œuvre des composites [23]. Lim et al. [24, 25, 26, 27, 28] se sont intéressés expérimentalement et théoriquement à la mise en œuvre par emboutissage et étirage du renfort pour optimiser la formabilité. La forme et les dimensions de l'outil ainsi que l'effort appliqué jouent un rôle important dans l'optimisation du procédé. Le tricot s'avère être une excellente structure textile pour ce type de procédé du fait de sa capacité à se déformer et par son aptitude à répartir de manière assez homogène les déformations dans la surface du tricot évitant ainsi d'importantes déformations localisées.

Rozant et al. [18] ont comparé la drapabilité des tissus et des tricotés en déformant le textile à l'aide d'un poinçon. D'après leur résultats, les tricotés nécessitent jusqu'à 25 fois moins d'énergie pour être mis en forme et arrivent à des niveaux de déformations trois fois plus importants que les tissus et sans former de plis. Une autre étude concerne le thermoformage de composites thermoplastiques [29, 30]. La mise en œuvre d'une forme complexe a été possible avec des renforts tricotés sans instabilités ni plis ce qui n'a pas été le cas avec les renforts tissés (Figure 1.21).

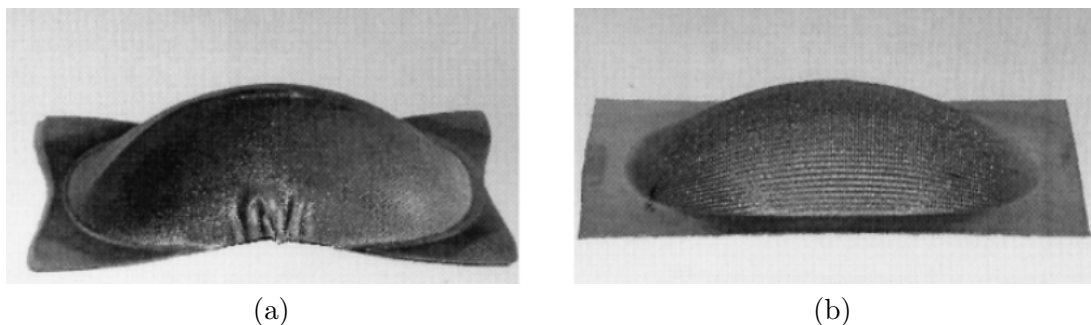


Figure 1.21 – Composite thermoplastique à renfort (a) tissé et (b) tricoté après mise en œuvre par thermoformage [30]

1.4 Propriétés mécaniques des composites à renforts tricotés

1.4.1 Comportement en traction

1.4.1.1 Propriétés en traction

De nombreux auteurs se sont intéressés au comportement en traction des composites à renforts tricotés. Leurs propriétés mécaniques dans le plan sont limitées en comparaison avec celles des composites à renforts unidirectionnels, tissés ou tressés du fait de la perte de l'alignement des fibres dans le matériau [7, 31, 32]. Leur rigidité et résistance se rapprochent de celles des composites à fibres courtes (Figure 1.22).

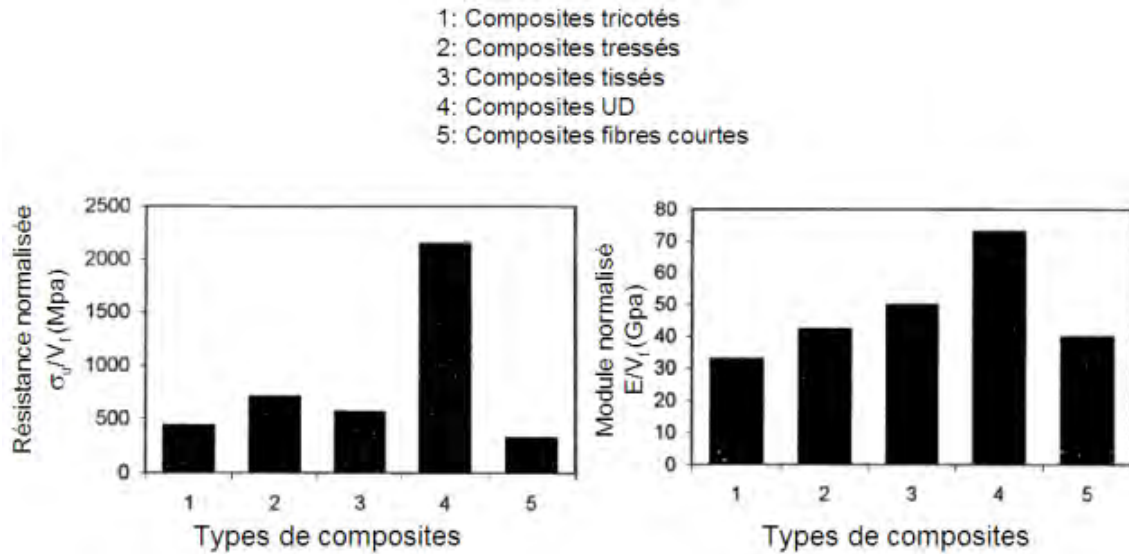


Figure 1.22 – Comparaison de la résistance et du module d'Young normalisés (par rapport au taux de fibres) des composites renforcés de différents types de renforts [32]

Leurs propriétés sont anisotropes [7, 33, 34, 35, 36, 37, 38] du fait de la distribution des fibres dans le composite. Les propriétés sont plus élevées dans la direction colonne du tricot qui est par convention la direction 0° (Figure 1.23.a). Ce phénomène a également été mis en évidence par Zhang et al. en réalisant des essais de traction sur des composites multicouches à renfort jersey en modifiant les orientations des différentes couches [32]. De cette manière il est possible de choisir une séquence d'empilements pour obtenir les propriétés optimales et le degré d'anisotropie voulu.

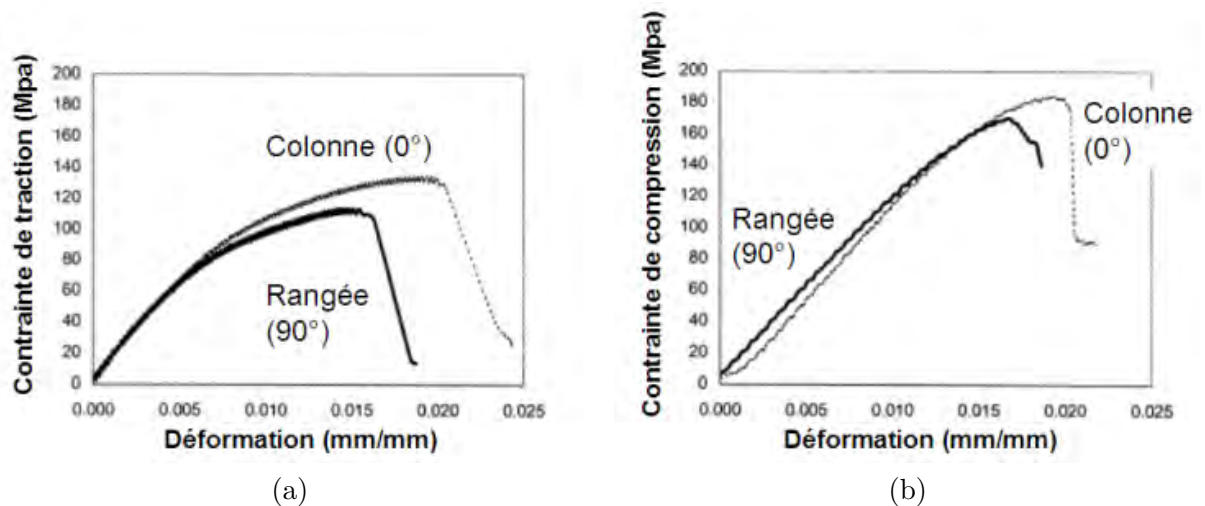


Figure 1.23 – Courbe contrainte-déformation de composites à renfort tricoté de contexture côte a) en traction et b) en compression [36]

Les caractéristiques mécaniques de ces matériaux dépendent de nombreux paramètres qui sont le type de texture, les paramètres géométriques du tricot et les paramètres de mise en œuvre du composite (taux de fibres, nombre de plis de renfort). La texture a un impact important sur le comportement du composite [34, 35, 39, 40]. Khondker et al. ont comparé le comportement des composites renforcés de textures côte, milano et jersey [40]. La figure 1.24 compare la résistance à la rupture des composites renforcés de ces textures en variant des paramètres tricots à des taux de fibres équivalents. Dans la direction 0° (colonne), la charge à la rupture et le taux de déformation les plus faibles ont été observés pour les composites à renfort côte et les plus élevés pour les composites jersey. Les propriétés du composite-milano se situent entre celles du composite-jersey et du composite-côte dans la direction 0° et sont équivalentes à celles du composite-côte dans la direction colonne. Selon la texture, le degré d'anisotropie du composite varie beaucoup. Une faible influence de la texture a été observée sur le module d'Young ou le coefficient de poisson du composite. Anwar et al. ont fait les mêmes observations sur les renforts côte et milano [34]. D'autres études se sont intéressées à différentes textures de renforts basées sur le jersey. L'insertion de fibres unidirectionnelles dans la rangée d'un tricot côte a pour conséquence l'augmentation de la rigidité et de la résistance dans cette direction [35]. Abounaim et al. ont mis en évidence une importante variation des propriétés en traction des composites en modifiant la texture jersey [39].

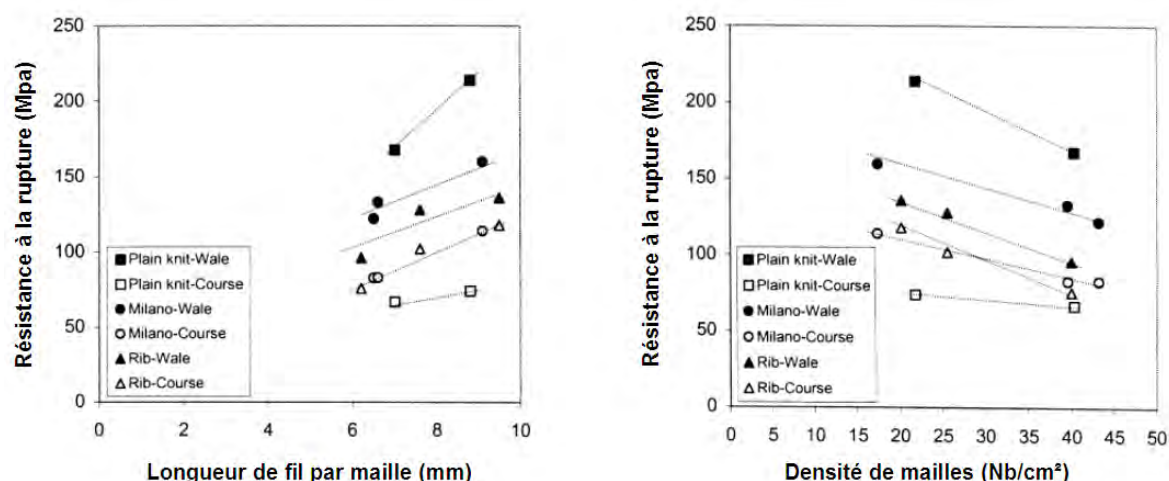


Figure 1.24 – Influence de la texture et des paramètres de tricots sur la résistance à la rupture en traction [36]

La manipulation des paramètres de tricotage tels que la densité de maille ou la longueur de fil par maille permettent également de modifier les propriétés des composites. A taux de fibres équivalents, une augmentation de la densité de mailles ou une diminution de la longueur de fil par maille entraîne une diminution de la résistance à la rupture mais a peu d'impact sur le module d'Young (Figure 1.24) [34, 40]. L'endommagement du matériau s'initie dans les zones de forte concentration de contrainte, c'est à dire les zones de croisement entre les mailles adjacentes. Une augmentation de la densité de maille implique une augmentation du nombre de fissures dans le matériau.

Les propriétés des composites sont affectées par la prétention du tricot avant mise en œuvre du composite [41, 42, 43]. Leong et al. ont étudié cet effet sur des composites verre/vinylester

à renfort milano. Une prétention du tricot dans la direction colonne entraîne une importante augmentation des propriétés dans la direction 0° du composite ainsi qu'une légère augmentation dans la direction 90° tandis qu'une prétention du tricot dans la direction rangée entraîne une augmentation des propriétés dans cette direction et une diminution dans la direction colonne [41]. Khondker et al. ont réalisé une étude plus complète sur ces mêmes renforts en étudiant l'effet de la prétension biaxiale et des taux de prétension dans l'une et les deux directions sur les propriétés mécaniques du composite [42]. Contrairement à la prétension uniaxiale, la déformation biaxiale n'engendre pas nécessairement de changement significatif dans la structure du tricot. Une modification des propriétés mécaniques est observée et reliée à une redistribution et une réorientation des fibres. Demboski et al. ont étudié l'effet de la prétension biaxiale des tricots côte composés de mèches hybrides verre/polypropylène sur les propriétés du composite et sont arrivés aux mêmes conclusions [43]. Dans toutes les études, de meilleurs résultats sont obtenus par une prétension du tricot dans la direction colonne et la modification des propriétés mécaniques est due à une redistribution et une réorientation des fibres.

Le nombre de plis dans le composite influence légèrement son comportement. Les composites multicouches présentent de meilleures propriétés que les composites monocouches du fait de l'imbrication des mailles des différentes couches les une dans les autres [44, 45].

Araújo et al. ont étudié l'influence de chacun de ces paramètres sur le comportement de composites renforcés de tricots jersey en fibres de verre. La direction de sollicitation ainsi que la prétention du tricot sont les paramètres les plus influents sur le comportement du composite. De plus les contextures jersey contenant des fibres non tricotées présentent les meilleures propriétés [19].

1.4.1.2 Mode d'endommagement

Selon Araújo et al. [19], le processus d'endommagement d'un composite à renforts tricotés en traction se produit en quatre étapes successives. Ces étapes se distinguent sur la courbe de contrainte/déformation représentées à la figure 1.25. Ramakrishna et al. [35] ont identifié les phénomènes d'endommagement correspondants en utilisant l'émission acoustique au cours d'un essai de traction. La première étape correspond à la partie linéaire de la courbe pendant laquelle le comportement du matériau est élastique. La perte de linéarité (étape 2) correspond à l'apparition de micro-fissures dues à des décohésions fibre/matrice qui ont généralement lieu au niveau des croisements entre les mailles. La troisième phase est parfaitement visible sur la courbe avec de petites oscillations qui correspondent à des propagations de fissure dans les zones adjacentes riches en résine et conduisent à un plan de rupture généralement perpendiculaire à la direction de sollicitation dans lequel seules les fibres assurent la liaison. L'effort est redistribué à ces fibres et la rupture finale de l'éprouvette a lieu par rupture des fibres (étape 4).

Selon la direction de sollicitation, la rupture a lieu à différents endroits du tricot (Figure 1.26) [32]. Sollicités dans la direction 0° , le plan de rupture est orthogonal à la direction de sollicitation et il est situé au dessus de la tête des mailles. Dans le cas d'une sollicitation à 90° , la rupture a lieu le long des croisements et des jambes des mailles selon un plan perpendiculaire à la direction de sollicitation. Á 45° , le même mode de rupture qu'à 90° est observé et le plan de rupture forme un angle de 45° par rapport à la direction de sollicitation.

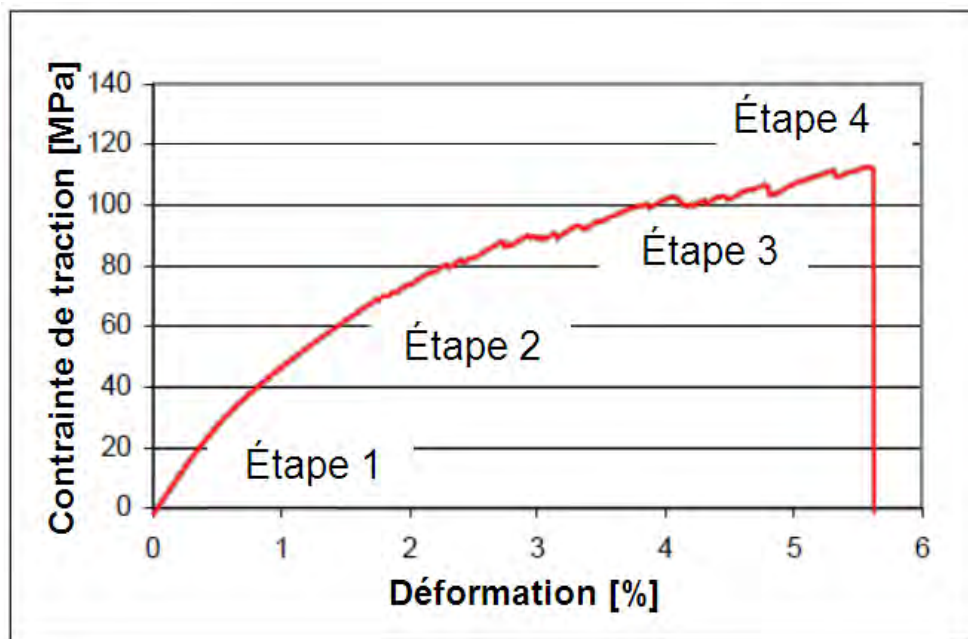


Figure 1.25 – Courbe de traction d'un composite à renforts tricotés [19]

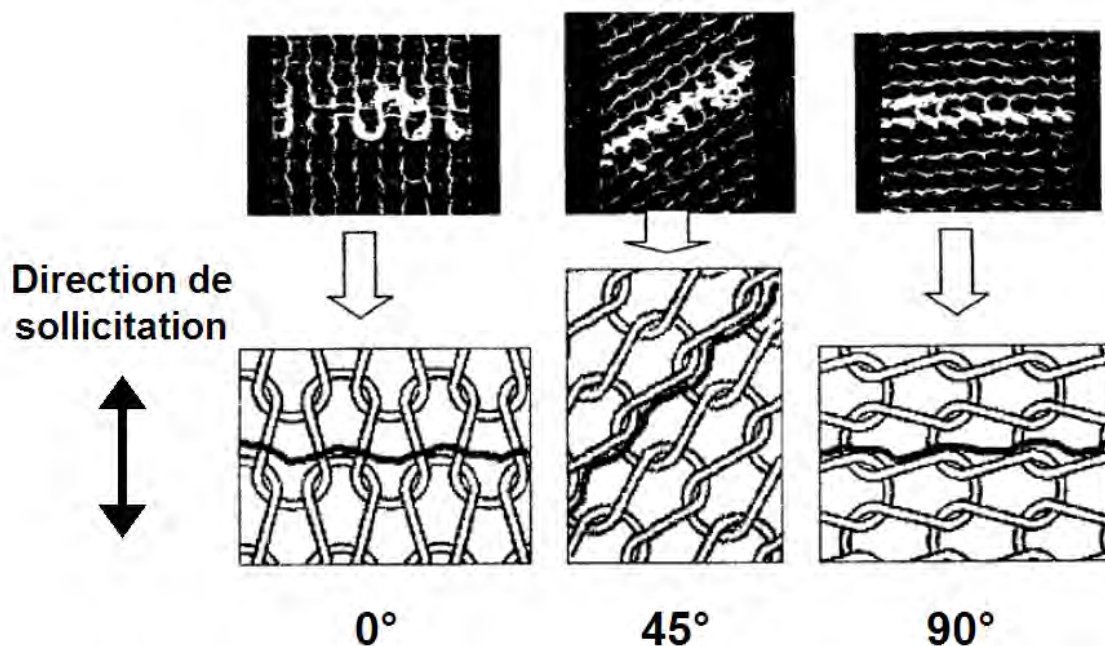


Figure 1.26 – Rupture caractéristique d'un composite renforcé d'un pli de tricot en fonction de la direction de sollicitation en traction [32]

1.4.2 Comportement en compression

Le comportement en compression des composites à renforts tricotés est quasiment isotrope par comparaison avec le comportement en traction (Figure 1.23.b) puisque leur comportement

est dominé par les propriétés de la matrice [33, 34, 36, 41, 42, 46]. Une forte dissymétrie traction-compression est observée en résistance à la rupture avec un rapport entre les résistances à 0° et 90° allant de 1,27 à 1,62 en traction et de 0,99 à 1,04 en compression selon les contextures du renfort [34]. Les propriétés en compression semblent indépendantes de la contexture du renfort, des paramètres de tricot, de la direction de sollicitation [34] ainsi que de la prétention du tricot [46]. Seule l'augmentation du taux de fibres a un effet non négligeable sur le comportement avec une amélioration des propriétés [33]. L'endommagement a lieu par flambement et est amplifié par la forme courbée des fibres dans le matériau, entraînant des décollement entre les fibres et la matrice. Ces micro-fissures apparaissent le long de l'éprouvette dans la direction de sollicitation en formant un motif régulier avec un espacement égal à la dimension des mailles (Figure 1.27). La rupture finale a lieu dans le plan des croisements des mailles normal à la direction de sollicitation [46].



Figure 1.27 – Éprouvette endommagée après compression [36]

1.4.3 Tenue à l'impact

Différentes études ont été menées pour caractériser la résistance aux chocs ainsi que la tolérance à l'endommagement. Khondker et al. [47] ont évalué l'endommagement après impact en mesurant la surface endommagée. La zone endommagée du composite à renfort tricoté est de forme circulaire et très localisée au niveau du point d'impact. L'aire diminue en augmentant la densité de mailles dans le composite. Ces matériaux présentent une zone endommagée moins importante que les composites à fibres longues traditionnels pour une même énergie d'impact et la différence entre les surfaces endommagées mesurées sur les composites à renfort tricotés et tissés augmente avec l'énergie d'impact (Figure 1.28). Ces propriétés s'expliquent par l'importante ténacité inter-laminaire des composites à renforts tricotés. En effet, Mouritz et al. [48] ont comparé les taux de restitution d'énergie critique G_{1c} des composites à renforts tricotés, UD, tissés et tressés obtenus à partir de tests DCB (Double Cantilever Beam) et ont mis en évidence que les renforts tricotés permettent d'obtenir des ténacités inter-laminaires supérieures à celles obtenues avec des renforts plus traditionnels. Falconnet et al. [49] ont mené une étude similaire sur des composites à renforts tissés et à renforts tricotés côte et milano et sont arrivés aux mêmes conclusions. Pandita et al. [50] ont mis en évidence le fait que ces propriétés découlent du mode d'endommagement et de la structure du renfort. L'endommagement a lieu par flexion, on observe des efforts de compression au niveau de la surface impactée et des efforts de tension au niveau de la surface non impactée qui conduisent à des fissurations au niveau de la matrice et des ruptures de fibres localisés au point d'impact. Cependant, du fait de la structure du tricot, les mailles des différents plis s'imbriquent les unes dans les autres, limitant ainsi la propagation de fissure dans la matrice et le phénomène de délaminage.

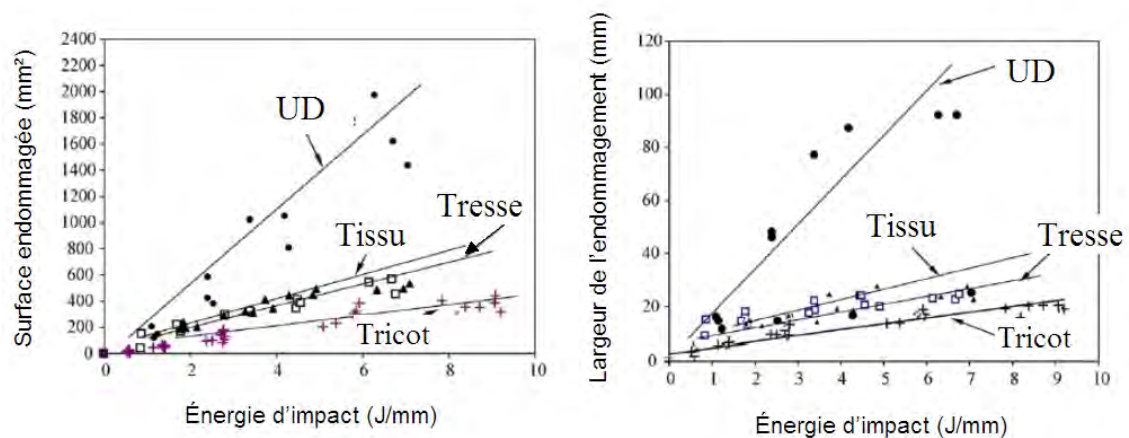


Figure 1.28 – Comparaison des surface et largeurs endommagées après impact de différentes structures composites [47]

L'essai de compression après impact (CAI) permet de quantifier la tolérance à l'endommagement. Khondker et al. [47] ont comparé la perte de la résistance en compression après impact de différentes structures composites en fonction de l'énergie d'impact (Figure 1.29). Les composites à renforts tricotés affichent la meilleure tolérance à l'endommagement avec une meilleure conservation de leurs propriétés en compression. Une perte de la résistance de 25% a été observée tandis que cette perte atteignait 40% pour les composites à renforts tissés et tressés et 60% pour les composites à renforts UD. Cette caractéristique est liée à un plus faible endommagement lors de l'impact et également à une meilleure résistance inter-laminaire des matériaux à renfort tricoté due à une meilleure distribution des fibres dans la matrice empêchant la propagation de fissure.

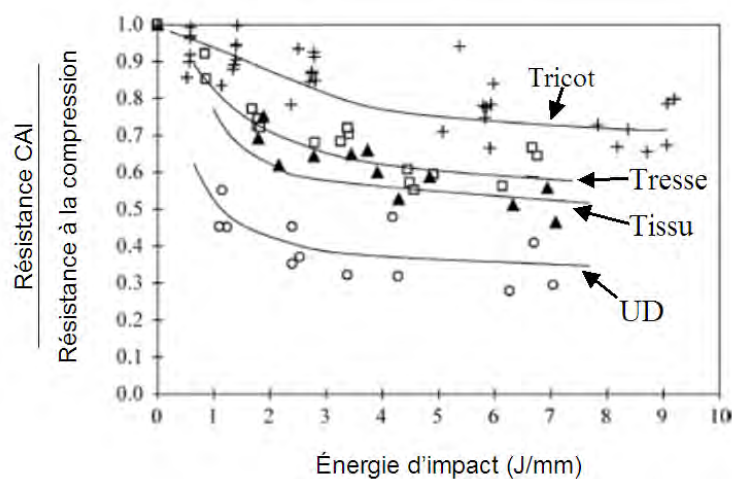


Figure 1.29 – Rapport de la résistance CAI par la résistance non-endommagée en fonction de l'énergie d'impact de différentes structures composites [47]

1.5 Modélisation des textiles tricotés et de leur comportement

Il existe différentes approches pour la modélisation des textiles qui peuvent être classées selon l'échelle de l'étude [15]. Nous devons à Hagege [15] un état de l'art sur la modélisation des textiles techniques et tricotés. Les modèles microscopiques s'intéressent à la modélisation de la mèche fibreuse et de son comportement. Les modèles analytiques sont employés dans l'étude des préimprégnés et les modèles numériques dans le cas des mèches sèches. Ces modèles sont souvent difficiles à mettre en œuvre et les temps de calcul sont longs [15]. L'échelle mésoscopique est dédiée à l'étude de la cellule élémentaire représentative (CER) en considérant la mèche comme un matériau continu. Les modèles macroscopiques étudient l'ensemble du textile et sont essentiellement dédiés à la modélisation pour la mise en œuvre de composites. Nous nous intéressons ici essentiellement à la modélisation des textiles tricotés. Les premiers modèles proviennent du milieu textile et consistent à décrire géométriquement la maille. Par la suite, les auteurs se sont intéressés à la modélisation mécanique de la maille au repos en considérant les efforts internes au tricot. Des approches similaires ont été suivies pour modéliser le comportement des tricots sollicités en traction. Des modèles analytiques et numériques ont également été mis au point pour la simulation du formage du textile lors de la mise en œuvre du composite.

1.5.1 Modélisation géométrique de la maille

Ces modèles consistent à décrire mathématiquement la configuration de la maille à partir des paramètres géométriques des tricots en définissant une géométrie idéalisée proche de la forme de la maille observée. Les premiers modèles sont issus du milieu textile et ont pour objectif d'obtenir la configuration de la maille à partir des paramètres du tricot. Ces paramètres sont généralement le diamètre de la mèche, la hauteur et la largeur de la maille (ou la densité de mailles par colonne et par rangée). Par la suite, ces modèles ont pu être intégrés dans des modèles de prédiction des propriétés mécaniques du composite puisqu'ils permettaient d'obtenir l'orientation des fibres dans le matériau. Le modèle le plus connu est celui de Leaf et Glaskin [51]. Il a été intégré dans des modèles de prédiction des propriétés élastiques des composites par Ramakrishna et Huang [12, 52, 53] que nous décrirons plus précisément au paragraphe 1.6. Il décrit mathématiquement la forme idéalisée d'une maille composée de quatre arcs de cercles (Figure 1.30.a) à partir des paramètres du tricot qui sont la densité de mailles par colonne, la densité de mailles par rangée et le diamètre de la mèche.

D'autres auteurs ont proposé des modèles équivalents destinés à définir la distribution des fibres dans le composite. Rudd et al. [38] présentent un modèle géométrique 2D de tricot jersey permettant d'obtenir l'orientation de la mèche dans le composite pour prédire ses propriétés mécaniques. La structure de la maille se compose de segments de droite et d'arcs de cercle et la géométrie est calculée à partir de la hauteur, la largeur et le rayon de la boucle (respectivement H , P et r sur le schéma de la figure 1.30.b) Leur modèle ne prend pas en compte le croisement entre les mailles. Dans la même optique, Ruan et al. ont développé un modèle géométrique d'un tricot jersey composé d'arcs de cercles et de segments mais prenant en compte l'entremêlement des mailles (Figure 1.30.c) et un modèle géométrique d'un tricot côte [11].

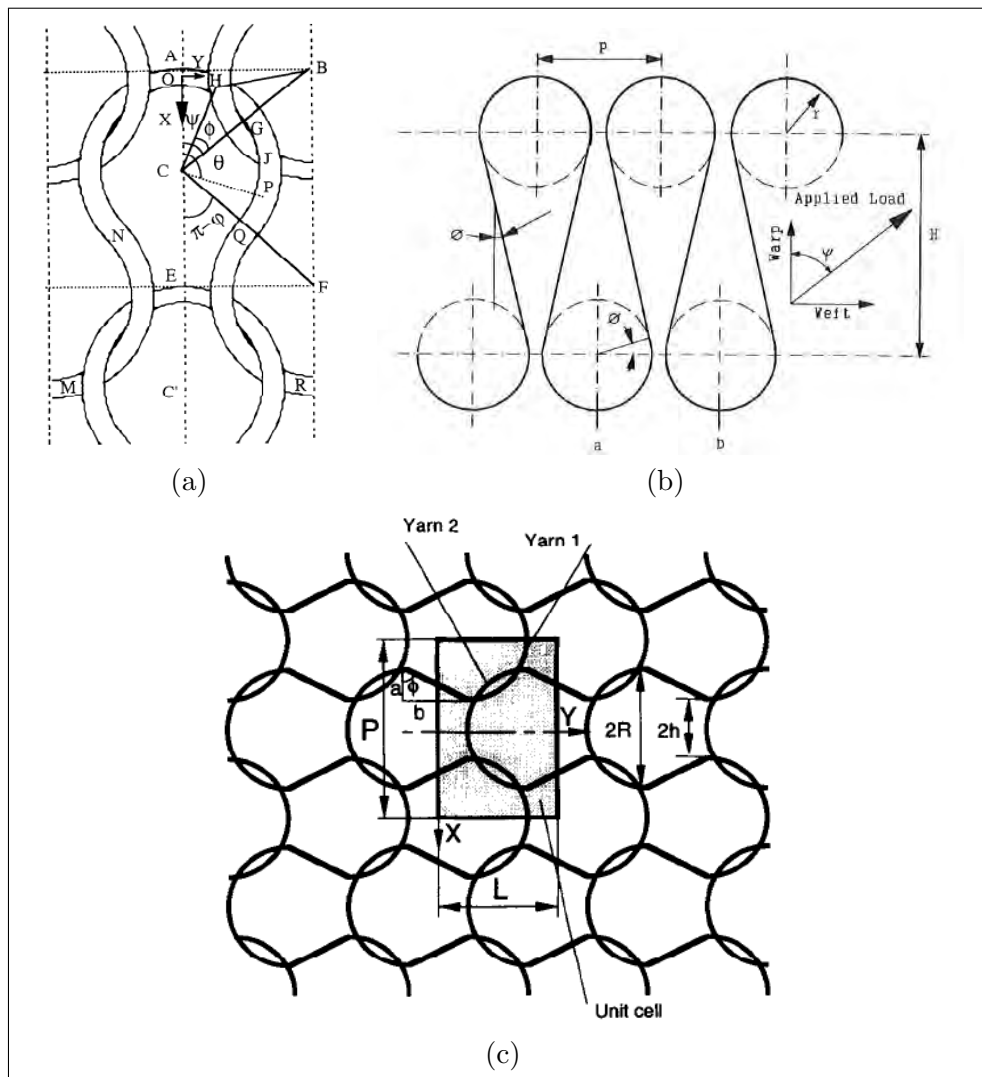


Figure 1.30 – Représentation géométrique d'un tricot jersey par le modèle de (a) Leaf et Glaskin [51], (b) Rudd et al. [38] et (c) Ruan et al.[11]

1.5.2 Modélisation mécanique de la maille

Une autre approche consiste à modéliser la maille jersey en prenant en compte les forces et couples qui s'exercent sur la maille lorsqu'elle est à son état d'équilibre. Le tricot est considéré comme une série de boucles entremêlées produisant des efforts de réactions entre elles au niveau des zones de contact entre les mailles adjacentes. Dans le but de prédire les paramètres géométriques des tricots en fonction des caractéristiques de la fibre, différents auteurs du domaine du textile ont suivi cette approche [54, 55, 56, 57, 58]. L'état d'équilibre de la maille est considéré lorsque aucune force extérieure n'est exercée sur le tricot et que les forces internes au tricot sont en équilibre. Lorsque le tricot est à l'état relaxé, il est supposé qu'il n'existe aucune tension dans le fil et que seules des forces de flexion générées par le fil qui tend à se redresser persistent, déterminant la configuration de la maille. Les efforts entraînant la flexion du fil sont créés par l'interaction entre les mailles adjacentes. En isolant une maille, cette

zone de contact. Shanahan et Postle [60, 61] ont utilisé l'approche de modélisation mécanique de la maille pour déterminer la courbe initiale d'effort-déformation d'un jersey en laine. La modélisation dans la direction rangée du tricot [60] est basée sur le modèle 2D de Postle et Munden de la figure 1.31.a. La modélisation dans la direction colonne [61] est basée sur leur modèle 3D de maille au repos de la figure 1.31.b. Dans les deux cas, les courbes d'effort-déformation sont obtenues en faisant varier les valeurs de l'effort P appliqué sur la maille. Les valeurs obtenues en direction rangée sont en accord avec l'expérience. Dans le cas de la traction colonne, les courbes théoriques se situent en dessous des courbes expérimentales puisque le frottement entre les mailles adjacentes n'a pas été pris en compte. Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence du frottement entre les mèches.

Par la suite, les propriétés d'effort-déformation de textiles tricotés techniques pour des applications composites ont été étudiées. Hong, Araújo et al. [21, 62] ont suivi une approche similaire à celle de Shanahan et Postle en proposant une analyse théorique basée sur la théorie de l'élasticité pour prédire la première phase du comportement en traction des tricotés jersey avant blocage des mailles qui correspond à la déformation structurale de la maille (Figure 1.20.a) dans les directions colonne et rangée d'un tricot jersey à base de fibres de verre. Leur analyse s'effectue en isolant un quart de maille (Figure 1.32). la configuration au repos est calculée à partir des paramètres géométriques de la maille. Dans leur modèle, la déformation est imposée en augmentant la hauteur ou la largeur de maille et les courbes d'effort-déformation sont obtenues en calculant l'effort qui doit être appliqué à la maille pour obtenir la nouvelle configuration. Les résultats qu'ils obtiennent sont en bon accord avec l'expérience.

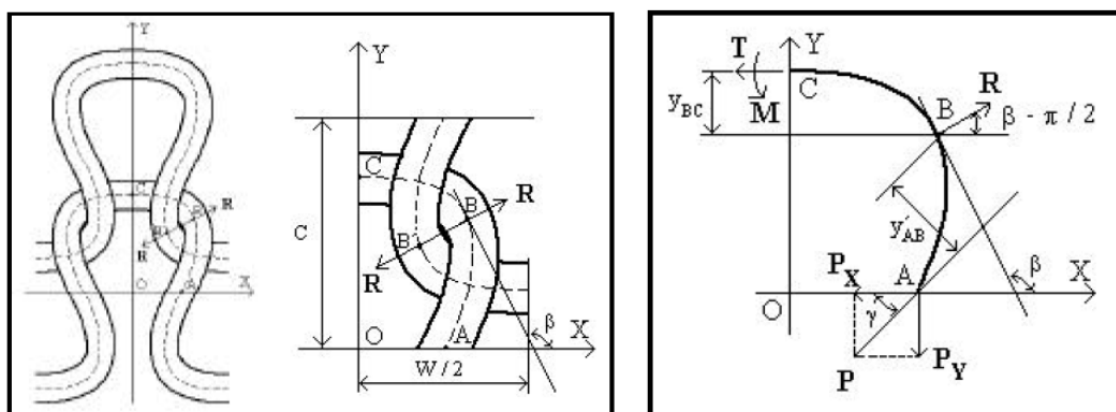


Figure 1.32 – Représentation de la CER et des forces appliquées sur le quart de maille isolé du modèle de Araújo [21]

Lim et al. se sont intéressés à la modélisation analytique de la formabilité des textiles tricotés par emboutissage et étirage [24, 25, 26, 27].

1.5.3.2 Modèles numériques

Wu et al. [63] et Araújo et al. [64] proposent un modèle éléments finis, dans lequel la maille est représentée en 2D par une structure en treillis hexagonale. Ce modèle permet de caractériser le comportement en traction du textile et également de simuler la déformation dans le plan du tricot dans une ou plusieurs directions et la déformation hors plan, pour simuler par exemple le drapage du tricot dans un moule avec une forme hémisphérique. Hagege

[15] a mis au point un modèle permettant de caractériser numériquement le comportement mécanique en grande transformations d'une maille jersey à partir de sa modélisation éléments finis 3D. Ce modèle vise à s'inscrire dans une démarche de simulation de la formabilité par emboutissage des renforts tricotés analogue à celle des textiles tissés [65].

1.6 Modélisation des propriétés élastiques des composites à renforts tricotés

Il existe deux approches pour modéliser les propriétés mécaniques des composites à renforts tricotés : la modélisation numérique par éléments finis qui utilise des logiciels de calcul de structure et la modélisation analytique. Dans les deux cas, la modélisation a lieu en considérant un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau. La modélisation par éléments finis est très complexe, dû à la difficulté de générer un maillage 3D de la maille et nécessite des temps de calculs très longs [31]. L'approche analytique est souvent privilégiée. Nous devons à Huang et Ramakrishna une synthèse des différentes approches de modélisation analytique des propriétés des composites à renforts tricotés [31].

1.6.1 Démarche adoptée dans la modélisation des composites à renforts tricotés

L'une des spécificités du matériau composite en général est son hétérogénéité. Il est nécessaire de représenter ce milieu comme un milieu homogène équivalent auquel pourront être appliquées les lois de la mécanique des milieux continus en prenant en compte les caractéristiques mécaniques et géométriques ainsi que la proportion de chacun des constituants. Le concept de rendre "homogène" un matériau hétérogène est appelé concept d'homogénéisation [1]. Dans le cas des composites à renfort textile, le VER du composite est subdivisé en sous-cellules composées d'UD et l'homogénéisation a lieu à deux niveaux d'échelle [3] :

- Passage du niveau micromécanique au niveau mésomécanique : L'étude se fait au sein d'une mèche imprégnée UD. Les hétérogénéités de base sont les fibres et la matrice. Une première étape d'homogénéisation est effectuée pour obtenir une homogénéisation locale à l'échelle mésoscopique. La mèche imprégnée est alors considérée comme "homogène".
- Passage du niveau mésoscopique au niveau macroscopique : les hétérogénéités de base sont les différentes sous-cellules considérées comme "homogènes". Cette fois, il s'agit d'une homogénéisation dans la totalité du VER à l'échelle macroscopique.

La majorité des modèles de prédiction des propriétés élastiques des composites à renfort tricoté suivent une approche similaire dont la démarche est décrite à la figure 1.33.

Les deux premières étapes (1-2) consistent à identifier un VER et l'orientation des fibres dans le VER. Pour cela une bonne connaissance de la géométrie de la maille est nécessaire. En prenant comme hypothèse que les fibres ne changent pas de position pendant l'imprégnation, l'orientation des fibres est déterminée par la géométrie du tricot sec avant mise en œuvre. Cette géométrie doit pouvoir être décrite analytiquement dans le système de coordonnées global du VER. Nous avons vu dans la section 1.5.1 qu'il existe de tels modèles géométriques dont notamment le modèle de Leaf et Glaskin [51] qui a été intégré dans des modèles de prédiction des propriétés des composites à renforts tricotés.

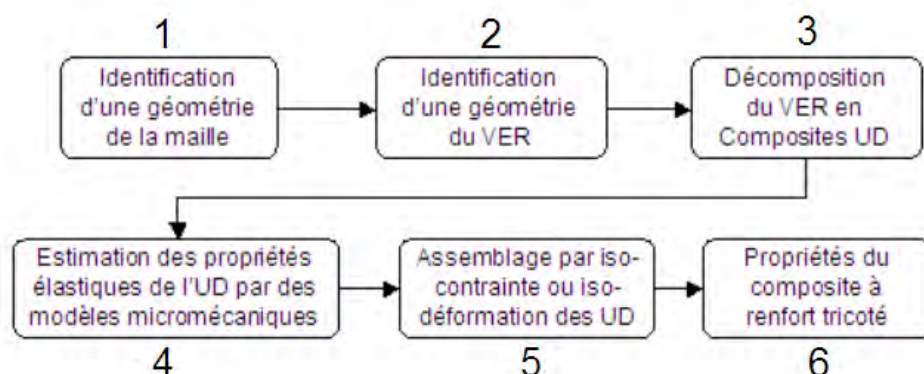


Figure 1.33 – Diagramme de la procédure d'analyse des composites à renfort tricoté [66]

La troisième étape (3) consiste à subdiviser le VER en sous-cellule pour obtenir une succession de segments de mèche assimilés à des composites UD.

Les propriétés élastiques de chaque sous-cellule sont déterminées dans un système de coordonnées local associé à l'UD, soit à l'aide d'un modèle micromécanique soit à partir de données expérimentales. Les propriétés obtenues sont calculées dans le repère global du VER par des relations de changement de base (étape 4).

L'étape 5 consiste à assembler la contribution de chacun des UD par homogénéisation pour obtenir les propriétés du composite (6).

L'homogénéisation se fait selon deux méthodes, la méthode de Voigt [67] qui considère que les éléments constitutifs d'une cellule sont soumis à la même déformation, dans ce cas les différentes phases de la cellule sont associées en parallèle ; et la méthode de Reuss [68] qui considère que les éléments d'une même cellule sont soumis à la même contrainte et sont associés en série (Figure 1.34). La première méthode est adaptée à l'obtention des propriétés élastiques dans le sens des fibres, tandis que la deuxième est utilisée pour les propriétés transverses.

1.6.2 Approche théorique du comportement élastique d'un composite unidirectionnel

De nombreux modèles de prédiction des propriétés élastiques d'un composite utilisent les modèles appliqués aux composites unidirectionnels. Un composite unidirectionnel est composé de fibres parallèles disposées dans une matrice (Figure 1.35.a). Le VER d'un tel matériau est composé d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice qui possède un axe de révolution noté 1 (Figure 1.35.b). La direction de cet axe est appelée direction longitudinale (L) et les directions perpendiculaires à cet axe sont appelées directions transversales (T). Le composite est considéré comme isotrope transverse, c'est à dire isotrope dans le plan normal à la direction 1.

1.6.2.1 Loi de Hooke pour un composite unidirectionnel

Le comportement élastique du composite est décrit par ses constantes de rigidité C_{ij} ou ses constantes de souplesse S_{ij} . La loi de Hooke de ces matériaux s'écrit suivant l'une des deux formes matricielles suivantes :

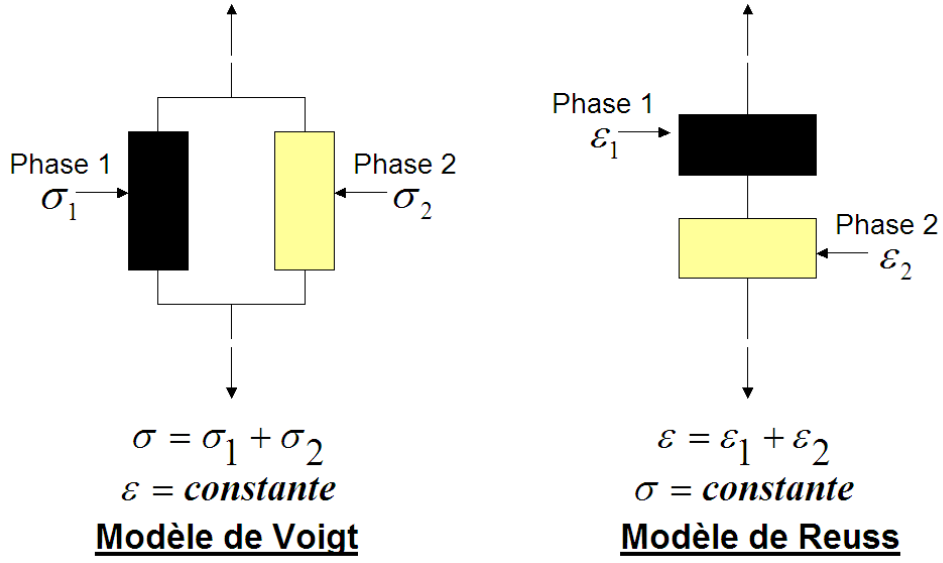


Figure 1.34 – Modèle de Voigt et de Reuss

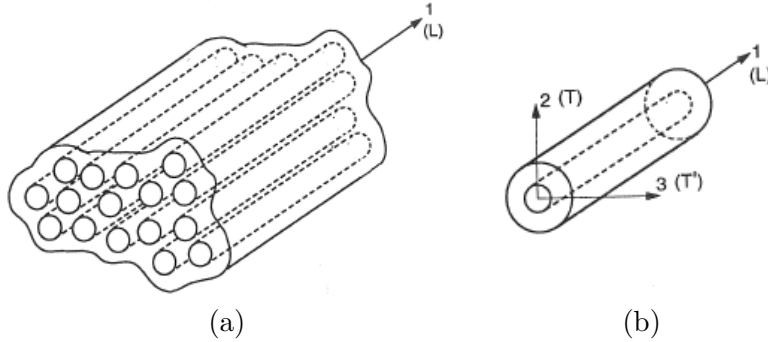


Figure 1.35 – Composite unidirectionnel

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Les matrices de rigidité et de souplesse sont inverses l'une de l'autre. Le comportement d'un composite unidirectionnel à isotropie transverse est caractérisé par 5 coefficients indépendants.

1.6.2.2 Détermination des modules d'élasticité

Les modules d'élasticité sont les modules d'Young, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement. Ils sont obtenus à partir d'essais mécaniques simples en imposant par exemple un champ de contrainte et en mesurant le champ de déformation. Il en résulte que les constantes de souplesse et de rigidité sont liées aux modules [1].

Les modules d'élasticité sont [1] :

- E_L et ν_{LT} , le module d'Young et le coefficient de Poisson mesurés dans un essai de traction longitudinal ;
- E_T , ν_{TL} et $\nu_{TT'}$, le module d'Young et le coefficient de Poisson mesurés dans un essai de traction transverse ;
- G_{LT} et $G_{TT'}$, les modules de cisaillement mesurés respectivement dans des essais de cisaillement longitudinal et transverse ;
- K_L , le module de compression hydrostatique mesuré dans un essai de compression hydrostatique latéral sans déformation longitudinale.

Les relations entre les modules d'élasticité et les constantes de souplesse sont données par :

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{E_L} \\
 S_{12} &= -\frac{\nu_{LT}}{E_L} \\
 S_{22} &= \frac{1}{E_T} \\
 S_{23} &= -\frac{\nu_{TT'}}{E_T} \\
 S_{66} &= \frac{1}{G_{LT}}
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

Le comportement mécanique d'un composite unidirectionnel est caractérisé par 5 grandeurs indépendantes (section 1.6.2.1). Les propriétés généralement utilisés dans la pratique sont : E_L , E_T , ν_{LT} , $\nu_{TT'}$ et G_{LT} . Ces caractéristiques élastiques peuvent également être déterminées par le calcul à partir d'approches micromécaniques simplifiées : les modèles d'homogénéisation.

1.6.2.3 Les modèles d'homogénéisation :

Les expressions des modules sont obtenues en faisant une approche simplifiée du comportement de la cellule unitaire. Il existe une multitude de modèles d'homogénéisation. Les modèles les plus couramment utilisés dans les modèles appliqués aux composites à renforts tricotés sont présentés ici. Généralement, ils nécessitent la connaissance des propriétés élastiques des matériaux qui composent l'UD et du taux de renforcement. Les modèles appliqués aux composites à renforts tricotés sont généralement la loi des mélanges, le modèle de Chamis et le modèle de Uemura qui est une variante du modèle de Chamis. La loi des mélange donne une bonne prédiction du module d'Young longitudinal mais perd en précision pour les autres constantes élastiques. Les modèles de Chamis et de Uemura permettent une meilleure prédiction des autres constantes élastiques.

– Loi des mélanges :

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m \quad (1.8)$$

$$\nu_{LT} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (1.9)$$

$$E_T = \frac{E_m}{1 - V_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)} \quad (1.10)$$

$$G_{LT} = \frac{G_m}{1 - V_f \left(1 - \frac{G_m}{G_f}\right)} \quad (1.11)$$

– Modèle de Chamis [69] :

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m \quad (1.12)$$

$$\nu_{LT} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (1.13)$$

$$E_T = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right)} \quad (1.14)$$

$$G_{LT} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_f}\right)} \quad (1.15)$$

$$G_{TT'} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}}\right)} \quad (1.16)$$

– Modèle de Uemura [70] :

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m \quad (1.17)$$

$$\nu_{LT} = \frac{1,05\sqrt{V_f}(\nu_f - \nu_m) \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f^2}\right)}{\left(\frac{E_f}{1 - \nu_f^2} - \frac{E_m}{1 - \nu_m^2}\right)} + \nu_m \quad (1.18)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1,36 \left(\frac{E_f}{1 - \nu_f^2} - \frac{E_m}{1 - \nu_m^2}\right)}{\left(\frac{E_f}{1 - \nu_f^2} - \frac{E_m}{1 - \nu_m^2}\right)^2 - \left(\frac{\nu_f E_f}{1 - \nu_f^2} - \frac{\nu_m E_m}{1 - \nu_m^2}\right)^2} + \frac{1 - 1,05\sqrt{V_f}}{E_m} \quad (1.19)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1,36}{\left(\frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} - \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}\right)} + \frac{1 - 1,05\sqrt{E_f}}{\frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}} \quad (1.20)$$

$$G_{TT'} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}}\right)} \quad (1.21)$$

– Modèle de Huang (« Bridging model ») :

Huang et al. proposent un nouveau modèle micromécanique, le "Bridging model" [71, 72, 73, 74, 75, 31, 76]. Ce modèle a l'avantage de pouvoir être appliqué dans les différentes phases du comportement du composite jusqu'à la rupture. L'analyse est menée sur un UD en ayant recours à une matrice de transition qui corrèle les contraintes générées respectivement dans la matrice et les fibres.

$$d\sigma_i^m = [A_{ij}]d\sigma_j^f \quad (1.22)$$

Avec $[A_{ij}]$ la matrice de transition.

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m \quad (1.23)$$

$$\nu_{LT} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (1.24)$$

$$E_T = \frac{(V_f + V_m a_{11})(V_f + V_m a_{22})}{(V_f + V_m a_{11}) \left(V_f S_{22}^f + a_{22} V_m S_{22}^m \right) + V_f V_m \left(S_{21}^m - S_{21}^f \right) a_{12}} \quad (1.25)$$

$$G_{LT} = G_m \frac{(G_f + G_m) + V_f (G_f - G_m)}{(G_f + G_m) - V_f (G_f - G_m)} \quad (1.26)$$

$$G_{TT'} = \frac{0.5 (V_f + V_m a_{22})}{V_f \left(S_{22}^f - S_{23}^f \right) + V_m a_{22} (S_{22}^m - S_{23}^m)} \quad (1.27)$$

1.6.3 Comportement élastique d'un composite à renfort tricoté

Dans cette section sont présentés les différents modèles de prédiction des propriétés élastiques des composites à renforts tricotés rencontrés dans la littérature. Excepté le modèle de Krenchel, tous les autres modèles suivent une démarche similaire à celle présentée précédemment dans la section 1.6.1 et résumé dans la figure 1.36.

1.6.3.1 Modèle de Krenchel

Rudd et al. [38] ont les premiers fait une estimation théorique de la rigidité de composites à renfort jersey en combinant la loi des mélanges donnée par l'équation 1.8 et le facteur d'efficacité η de renforcement proposé à l'origine par Krenchel [77] pour les composites à matrice ciment renforcée de fibres courtes.

Le modèle de Krenchel s'exprime de la manière suivante :

$$E_c = \eta V_f E_f + V_m E_m \quad (1.28)$$

L'efficacité de renforcement est définie comme la capacité des fibres à supporter la charge. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Les fibres alignées parallèlement à la direction de sollicitation affichent la meilleure capacité de renforcement, leur efficacité est égale à 1. Pour les fibres orientées dans une direction quelconque, l'efficacité se définit comme le rapport entre la charge supportée par ces fibres et celle supportée par les fibres orientées dans la direction de sollicitation. D'après Rudd et al., l'efficacité s'exprime de la manière suivante :

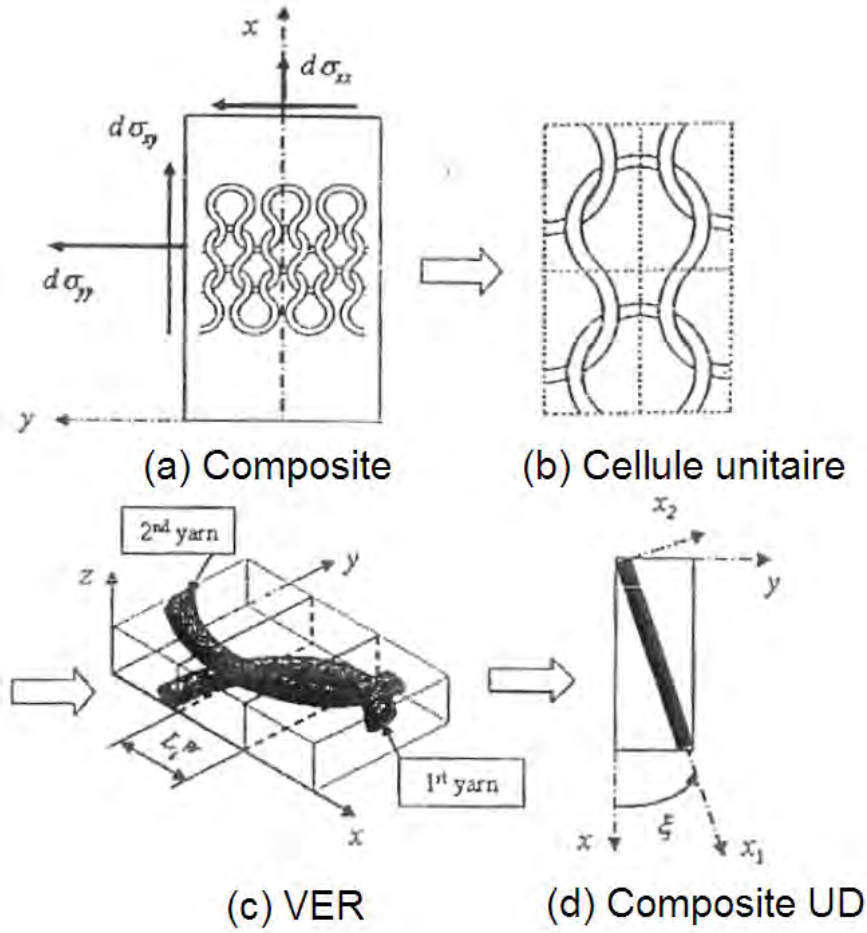


Figure 1.36 – Diagramme de l'analyse d'un composite à renfort tricoté [76]

$$\eta = \sum a_i \cos^4(\alpha_i) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n L_i \cos^4(\alpha_i) \quad (1.29)$$

Ou bien :

$$\eta = \int a_i \cos^4(\alpha_i) dl = \frac{1}{L} \int_0^L \cos^4(\alpha_i) dl \quad (1.30)$$

a_i est la proportion de fibres orientées dans la direction faisant un angle α_i avec la direction de sollicitation. L est la longueur de fil totale dans la maille et L_i , la longueur du segment de fil orienté d'un angle α_i avec la direction de sollicitation. n correspond au nombre de segments de fil.

Ce modèle a également été appliqué par Ramakrishna et Hull [78] pour prédire les propriétés élastiques des composites à renfort tricoté en fibres de carbone. Une bonne prédiction est obtenue avec ce modèle. Les écarts observés avec les valeurs expérimentales s'expliquent par

l'approximation faite sur la géométrie de la maille. L'avantage de ce modèle est sa simplicité cependant il est limité au calcul du module longitudinal du composite.

1.6.3.2 Approche de Ruan et Chou

Ruan et Chou [11] ont appliqué la démarche présentée dans la section 1.6.1 pour prédire les propriétés élastiques de composites à renfort côte et jersey. Dans un premier temps, ils ont déterminé un modèle géométrique du tricot jersey (Figure 1.30 de la section 1.5.1) et du tricot côte et un VER composé de deux fils qui s'entrecroisent (Figure 1.37) et subdivisé en sous-cellules composées de segments d'UD.

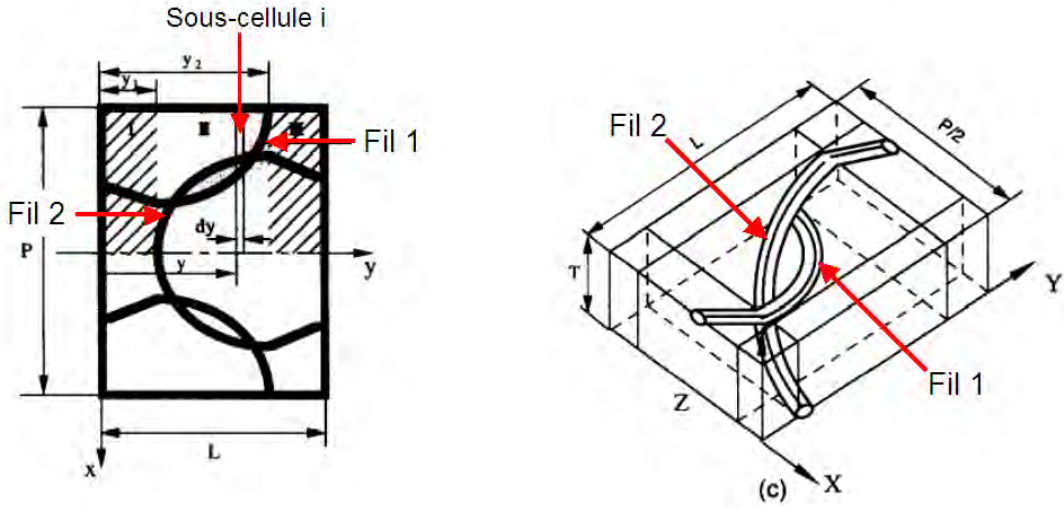


Figure 1.37 – Cellule élémentaire représentative (CER) et VER du modèle de Ruan et Chou [11]

Les propriétés élastique dans le système de coordonnées local associé à l'UD sont obtenues à partir de données expérimentales et par une série de modèles [79]. Les propriétés de chaque UD sont calculées dans le système global du composite par transformation matricielle. La matrice de rigidité de chaque sous-cellule composée de 2 segments de mèche imprégnée est déterminée par la méthode de Voigt en considérant que tous les éléments d'une même sous-cellule sont soumis à la même déformation (eq :1.31). Les propriétés du VER sont obtenues en considérant que toutes les sous cellules sont soumises à la même contrainte et la matrice de souplesse à partir de laquelle sont calculés les modules élastiques du VER est calculée par la méthode de Reuss (eq :1.32).

$$[C]_i = \sum_{j=1}^{n_i} V_i^j [C^Y]_i^j + \left(1 - \sum_{j=1}^{n_i} V_i^j \right) [C^m] \quad (1.31)$$

Avec $[C]_i$, $[C^Y]_i^j$ et $[C^m]$, les matrices de rigidité de la $i^{\text{ème}}$ sous-cellule, de la $j^{\text{ème}}$ mèche de la $i^{\text{ème}}$ sous-cellule et de la matrice et V_i^j , le taux de fibres du $j^{\text{ème}}$ fil dans la $i^{\text{ème}}$ sous-cellule.

$$[S] = \sum_{i=1}^M \frac{L_i^T}{L^T} ([C]_i)^{-1} \quad (1.32)$$

Avec $[S]$, la matrice de souplesse du composite, M , le nombre de sous-cellules, L^T , la longueur totale de fil dans le VER comprenant les 2 mèches et L_i^2 , la longueur de fil dans la $i^{\text{ème}}$ sous-cellule, comprenant les 2 segments de mèche.

1.6.3.3 Approche de Gommers

Dans leur démarche, Gommers et al. [80] ont utilisé séparément le modèle de Voigt et de Reuss pour déterminer les bornes des propriétés élastiques du matériau. L'étude porte sur les composites renforcés de tricot à mailles jetées. L'orientation des fibres est déterminée sur le tricot sec et le VER est subdivisé en sous-cellules comprenant des segments d'UD. Le modèle de Chamis (section 1.6.2.3) est utilisé pour calculer les éléments de la matrice de rigidité et de souplesse de chaque UD dans leur repère local associé. Après transformation matricielle, la contribution de chaque élément est exprimée dans le repère global associé au VER. Les matrices de rigidité et de souplesse du composite sont déterminées respectivement par le modèle de Voigt et le modèle de Reuss (eq : 1.33 et 1.34). En comparant les résultats avec l'expérience, ils ont mis en évidence le fait que les valeurs expérimentales de module se situent entre les valeurs obtenues avec chacun des modèles.

$$[C]^V = V_m[C^m] + (1 - V_m) \left[\sum \frac{L_i^T}{L^T} [C]_i \right] \quad (1.33)$$

$$[S]^R = C_m[S^m] + (1 - V_m) \left[\sum \frac{L_i^T}{L^T} [S]_i \right] \quad (1.34)$$

Pour améliorer la précision du modèle, ils ont également utilisé la combinaison des modèle de Voigt et Reuss, la méthode de Voigt-Reuss-Hill représentée par :

$$[S]^{VRH} = \frac{1}{2} \left[[S]^R + ([C]^V)^{-1} \right] \quad (1.35)$$

Les résultats obtenus avec la méthode de Voigt-Reuss-Hill donnent une meilleure prédiction des propriétés élastiques du composite

1.6.3.4 Modèle de Ramakrishna (cross-over model)

Ramakrishna et al. [12, 52, 53, 81] ont adopté une démarche similaire qui est schématisée à la figure 1.38. Contrairement aux modèles de Ruan et Chou et de Gommers, les calculs sont opérés sur les constantes d'élasticités plutôt que sur les matrices de rigidité et de souplesse.

Dans un premier temps, l'orientation de la mèche dans le composite a été déterminé en utilisant le modèle de Leaf et Glaskin [51] présenté dans la section 1.5.1 en estimant un diamètre de mèche avec la méthode décrite à la section 1.2.3.1.1. Le VER est constitué de deux mèches imprégnées qui s'entrecroisent (Figure : 1.39) et dans lequel on distingue deux phases : une phase riche en résine (résine pure) et une phase riche en fibres (mèche imprégnée).

Dans un premier temps, seules les mèches imprégnées sont considérées. Chacune d'elle est subdivisée en une multitude de segments d'UD dont les modules d'élasticité sont calculés à partir du modèle d'homogénéisation de Uemura décrit à la section 1.6.2.3 dans leur repère local associé, puis dans le repère global par des relations de changement de base.

En considérant chaque segment d'UD soumis à la même déformation dans la direction de sollicitation, les constantes d'élasticité d'une mèche imprégnée et la matrice de rigidité

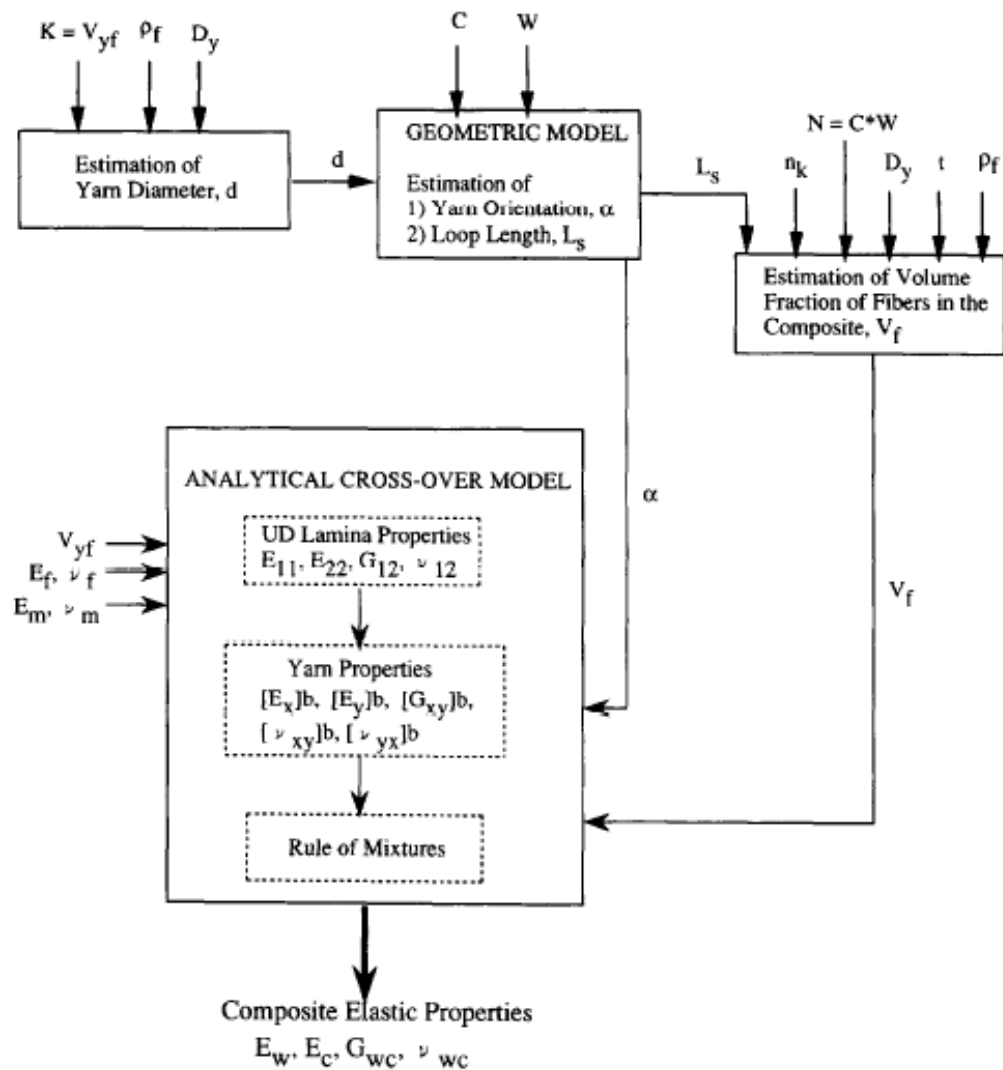


Figure 1.38 – Diagramme du modèle analytique de prédiction des propriétés élastiques d'un composite jersey de Ramakrishna [12]

associée sont calculées.

En considérant que les deux mèches sont soumises à la même déformation, la matrice de rigidité ainsi que les constantes d'élasticité équivalentes à la contribution de l'ensemble des deux mèches imprégnées sont calculées.

Le VER est alors assimilé à un matériau composé de deux phases : les deux mèches imprégnées assimilées à un matériau homogène d'une part et la résine pure d'autre part. Le modèle de Uemura est alors appliqué pour calculer les propriétés élastiques du composite.

Les valeurs prédites par le modèle présentent des écarts d'environ 20% avec les valeurs obtenues expérimentalement.

Hormis dans le modèle de Krenchel, les mèches imprégnées et la matrice pure ont été

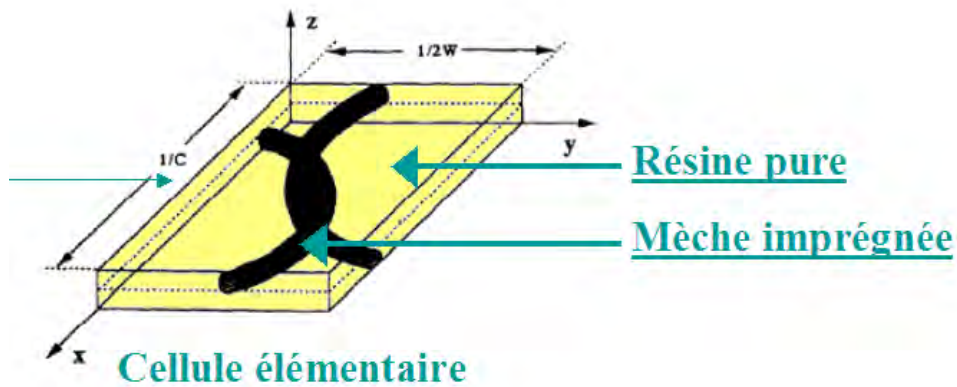


Figure 1.39 – VER du modèle de Ramakrishna [12]

étudiés séparément. Après discrétisation, les mèches imprégnées ont été considérées comme un ensemble de segments d'UD présentant un certain taux de fibres. Ce taux de fibres est difficile à estimer précisément. Les valeurs de renforcement utilisées dans les modèles sont très différentes. Elles peuvent être estimées expérimentalement en observant une section de mèche et théoriquement en supposant un arrangement particulier des fibres dans la mèche. Hearle et al. [13] ont calculé un taux de fibres de 0.75 avec un arrangement concentrique (Figure 1.40.a) et un taux de fibres de 0.907 avec un arrangement hexagonal (Figure 1.40.b). Ruan et Chou ont utilisé le motif hexagonal 0.907, Ramakrishna et al., le motif concentrique 0,45 et Gommers et al. ont estimé expérimentalement un taux de fibres de 0.55.

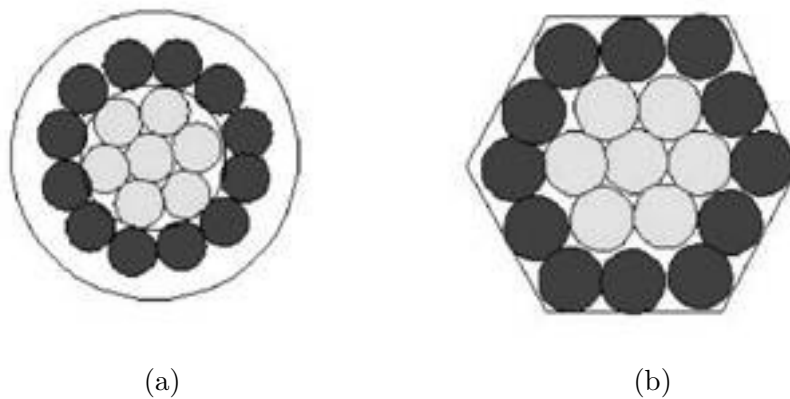


Figure 1.40 – Arrangement des fibres dans la mèche selon un motif (a) concentrique et (b) hexagonal [13]

L'étude comparative de Huang [31] montre que ces modèles donnent une prédiction des propriétés élastiques avec une erreur allant de 10% à quasiment 30% avec l'expérience selon l'approche adoptée et le modèle micromécanique utilisé. Le modèle micromécanique de Huang et al. donne de meilleurs résultats que le modèle de Chamis. Le modèle de Krenchel offre une très bonne prédiction du module longitudinal du composite. Les meilleures prédictions sont obtenues avec l'approche de Ruan et Chou. Dans l'approche de Gommers et al., l'utilisation

de la méthode de Voigt-Reuss-Hill donne les meilleurs résultats. L'étude comparative ne prend pas en compte le modèle de Ramakrishna, cependant, les erreurs calculées par les auteurs se situent dans la moyenne des erreurs calculées avec les autres modèles.

1.7 Conclusion du chapitre

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence les intérêts et les limites des textiles tricotés en tant que renfort de composites. Les tricots techniques présentent de nombreux avantages pour la mise en œuvre de pièces composites de formes complexes. Le procédé automatisé de tricotage permet de réaliser rapidement des renforts directement à la forme de la pièce désirée. Les études expérimentales réalisées sur des tricots techniques secs ont mis en évidence leur importante déformabilité qui leur confère une excellente drapabilité.

Les composites à renforts tricotés affichent des propriétés intéressantes à l'impact. La forme tridimensionnelle des mailles leur permet de s'imbriquer les unes dans les autres lors de l'élaboration du matériau. Par conséquent, ils présentent une ténacité inter-laminaire plus élevée que les composites à renforts tissés se traduisant par une zone endommagée plus localisée. Ce qui leur confère également une tolérance à l'endommagement plus importante.

Leurs propriétés mécaniques dans le plan sont toutefois relativement faibles et comparables à celles des composites à fibres courtes. Une forte dissymétrie traction-compression est observée. Leur comportement en compression est quasi isotrope et dépend essentiellement du taux de fibres. En revanche leur propriétés en tractions sont anisotropes et dépendent de nombreux paramètres liés à la contexture, aux caractéristiques géométriques du tricot ou à l'élaboration du composite (taux de fibres et taux de prétension du renfort). Leur comportement est lié à la distribution des fibres dans la matrice.

La majorité de ces études concernent les tricots en fibres de verre et aucune étude à notre connaissance n'a étudié l'influence de la nature de la fibre sur le comportement des composites.

Les travaux de cette thèse vont concerner successivement le comportement en traction du tricot sec et celui du composite élaboré par injection. L'étude porte sur l'influence de la contexture du tricot et celle de la nature de la fibre pour permettre d'identifier les différents paramètres qui entrent en jeu et d'établir des relations entre l'architecture du renfort et le comportement du composite.

Concernant les études théoriques, différentes approches ont été recensées pour modéliser le comportement d'un textile tricoté. Le modèle analytique mis au point par Araújo et al. [21] donne une bonne prédiction du comportement en traction du tricot jersey sec et permet également de modéliser mécaniquement la maille. Concernant les composites, nous nous intéressons essentiellement aux modèles analytiques. Ces modèles suivent tous une approche identique, basée sur le principe de l'homogénéisation, qui consiste à estimer les propriétés élastiques du composites à renfort jersey à partir d'un modèle géométrique de la maille.

Chapitre 2

Étude de la déformabilité des textiles tricotés

Sommaire

2.1	Fibres et préformes tricotées	49
2.1.1	Fibres	49
2.1.2	Contextures tricotées simples	51
2.2	Essais de traction uni-axiale	55
2.2.1	Moyens et procédure	55
2.2.2	Exploitation des résultats	57
2.3	Comportement des tricots secs simples	58
2.3.1	Comportement général d'un tricot sec	58
2.3.2	Comportement structural du tricot	62
2.3.3	Reprise d'effort par les fibres	71
2.3.4	Conclusion intermédiaire	74
2.4	Optimisation de la contexture jersey	76
2.4.1	Contextures tricotées	76
2.4.2	Comportement en traction des tricots jersey chargés	79
2.4.3	Conclusion sur l'influence de fils flottés sur le comportement des tricots secs	86
2.4.4	Comparaison du comportement des tricots jersey et jersey chargé avec un tissu satin	87
2.5	Conclusion du chapitre	87

Le chapitre précédent a mis en évidence le comportement très déformable des tricots secs d'une part, mais également la capacité du procédé de tricotage pour élaborer des tricots de différentes architectures. L'objectif de ce chapitre est de comprendre le comportement des tricots à base de fibres techniques lorsqu'ils sont sollicités en traction uniaxiale, de déterminer les paramètres qui entrent en jeu et d'étudier l'influence de la nature de fibre et de la contexture sur leur comportement. Dans un premier temps l'étude se concentre sur les tricots de référence simple et double fonture qui sont le jersey et la côte dans le but de comprendre leur comportement. Cette étude permet d'établir une base pour expliquer dans un second temps l'influence de l'insertion de mèches non tricotées dans la largeur du tricot sur le comportement par modification du nombre de mèches insérées par rangée de tricot. L'effet de la nature de la fibre est également pris en compte à travers trois différents types de fibres : la fibre de verre, le fibre de basalte et la fibre de carbone haute résistance.

2.1 Fibres et préformes tricotées

2.1.1 Fibres

Trois natures de fibres sont étudiées : le verre, le basalte et le carbone. Les fibres de verre et de carbone sont actuellement les plus utilisées dans les renforts de matériaux composites à matrice organique. La première est destinée aux matériaux de grande diffusion du fait d'un excellent rapport qualité/prix, la seconde est destinée à des matériaux structuraux et présente d'excellentes propriétés mécaniques mais un coût élevé. La fibre de basalte encore peu utilisée dans les composites à matrice organique est en voie d'émergence. Elle présente de bonnes propriétés physico-chimiques, de meilleures propriétés mécaniques que la fibre de verre avec un coût légèrement supérieur en raison de sa faible diffusion.

2.1.1.1 Choix des mèches

Les tricots sont élaborés à partir de mèches de fibres ou roving qui se présentent sous forme de bobine (Figure 2.2). Les mèches ont été choisies dans le but de réaliser des tricots de paramètres identiques pour une même contexture, c'est à dire avec des mailles de dimensions égales. Les caractéristiques géométriques du tricot sont liées aux paramètres de tricotage qui sont interdépendants (cf. section 1.2.3.3). Les sections des mèches doivent donc être équivalentes. Une estimation de la section de la mèche est alors nécessaire. Celle-ci est considérée comme étant circulaire avec un empilement hexagonal parfait des filaments dans la mèche conduisant à un coefficient d'occupation des fibres dans la mèche ou taux de fibres dans la mèche V_{fm} égal à 0,91 [13] (Figure 2.1). La section S_m et le diamètre d_m d'une mèche sont déterminés selon les relations données dans l'équation 2.1.

$$S_m = \frac{S_f}{V_{fm}} \quad d_m = \sqrt{\frac{N_f}{V_{fm}}} d_f \quad (2.1)$$

2.1.1.2 Caractéristiques de mèches

Les caractéristiques des mèches, données dans le tableau 2.1, sont déterminées à partir de propriétés des fibres fournies par le fabricant. Le diamètre est calculé avec l'équation 2.1 et la rigidité en flexion et la raideur en traction sont déterminées à partir des formules données à la section 1.2.3.1.2. Pour la rigidité en flexion, il est nécessaire de calculer le moment quadratique

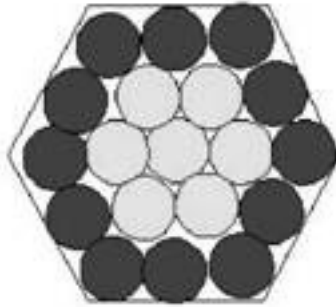
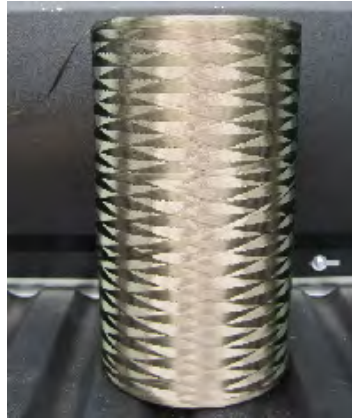


Figure 2.1 – Arrangement des fibres dans la mèche selon un motif hexagonal [13]



(a)



(b)



(c)

Figure 2.2 – Rouling de (a) fibres de verre, (b) de fibres de basalte et (c) de fibres de carbone

de la mèche. Celui-ci est estimé à partir d'une expression simplifiée donnée par l'équation 2.2 comme étant la somme des moments quadratiques de chacun des filaments de la mèche. Un calcul détaillé présenté en annexe A montre que l'erreur provenant de cette simplification est quasiment nulle et que la forme de la mèche (circulaire ou elliptique) ainsi que l'arrangement compact ou espacé des filaments ont une influence négligeable sur le moment quadratique et le module de flexion.

$$I_{GZ} = \frac{N_f \times \pi \times d_f^4}{64} \quad (2.2)$$

Les diamètres de mèche estimés pour les trois natures de fibre sont bien équivalentes. Les mèches en fibres de verre présentent une rigidité plus importante en flexion et les mèches en fibres de carbone ont une rigidité en traction plus élevée.

FIBRES	VERRE	BASALTE	CARBONE
Désignation	Owens corning Vetrotex T30 111AX23	Basaltex BCF	Toho Tenax HTA 5131 6K Z10
N_f^1	1200	1672	6000
d_f^1	16 μm	13 μm	7 μm
ρ_f^1	2620 $kg.m^{-3}$	2700 $kg.m^{-3}$	1760 $kg.m^{-3}$
E_f^1	80 GPa	84 GPa	238 GPa
MÈCHES	VERRE	BASALTE	CARBONE
d_m	0,58 mm	0,56 mm	0,57 mm
Densité linéaire ¹² (D_y)	600 tex	600 tex	400 tex
Rigidité en flexion	0,31 $N.mm^2$	0,20 $N.mm^2$	0,16 $N.mm^2$
Raideur en traction	19,3 $kN.mèche^{-1}$	18,6 $kN.mèche^{-1}$	54,9 $kN.mèche^{-1}$

1. Données fabricant

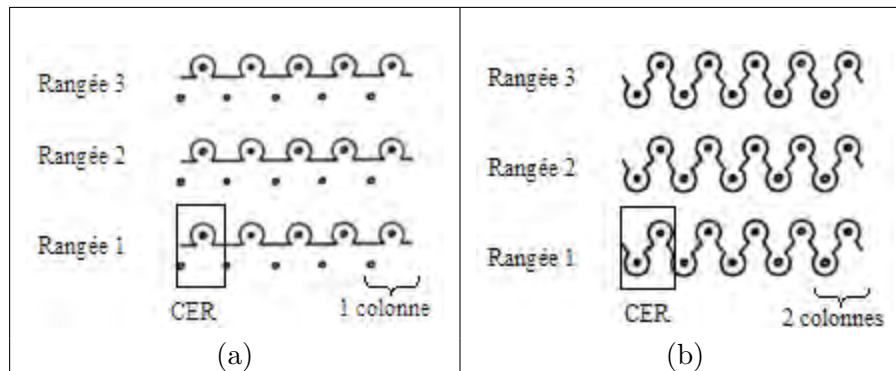
2. 1 $tex=1 g.km^{-1}$ **Tableau 2.1** – Caractéristiques des fibres et des mèches

2.1.2 Contextures tricotées simples

La première partie de l'étude consiste à comprendre le comportement d'un tricot sec en traction uniaxiale et de déterminer l'influence des différents paramètres liés à la contexture, au tricotage et à la nature de la fibre. Pour cela l'étude est réalisée sur les tricots de contextures simples : le jersey et la côte.

2.1.2.1 Mise en œuvre des textiles tricotés

Les tricots ont été réalisés chez TAT (Textile Aéro Tarn) sur un métier rectiligne double fonture avec une jauge 5 (5 aiguilles par pouce). Les diagrammes techniques des contextures sont donnés dans la figure 2.3.

**Figure 2.3** – Diagramme technique du tricot (a) jersey et (b) côte

La même jauge est utilisée pour les tricots côte et les tricots jersey. Comme schématisé sur la figure 2.3, les fontures sont disposées de manière à ce que les aiguilles soient positionnées en quinconce. Toutes les aiguilles d'une seule fonture sont actionnées pour fabriquer le jersey et toutes les aiguilles des deux fontures sont actionnées pour fabriquer la côte. Une rangée de côte contient donc deux fois plus de mailles qu'une rangée de jersey. Sur la figure 2.4

sont présentées les photos des tricots côte et jersey avec les trois natures de fibres. Des fibres peuvent être endommagées pendant le tricotage, faisant apparaître un duvet de fibres rompues à la surface du tricot. Les tricots jersey présentent ce duvet sur une seule face, tandis que les tricots côte le présentent sur les deux faces. La quantité de fibres endommagées n'est pas quantifiée, cependant elle est visuellement plus importante pour les tricots de contexture côte et les tricots en fibres de carbone, pour lesquels la fibre est plus rigide.

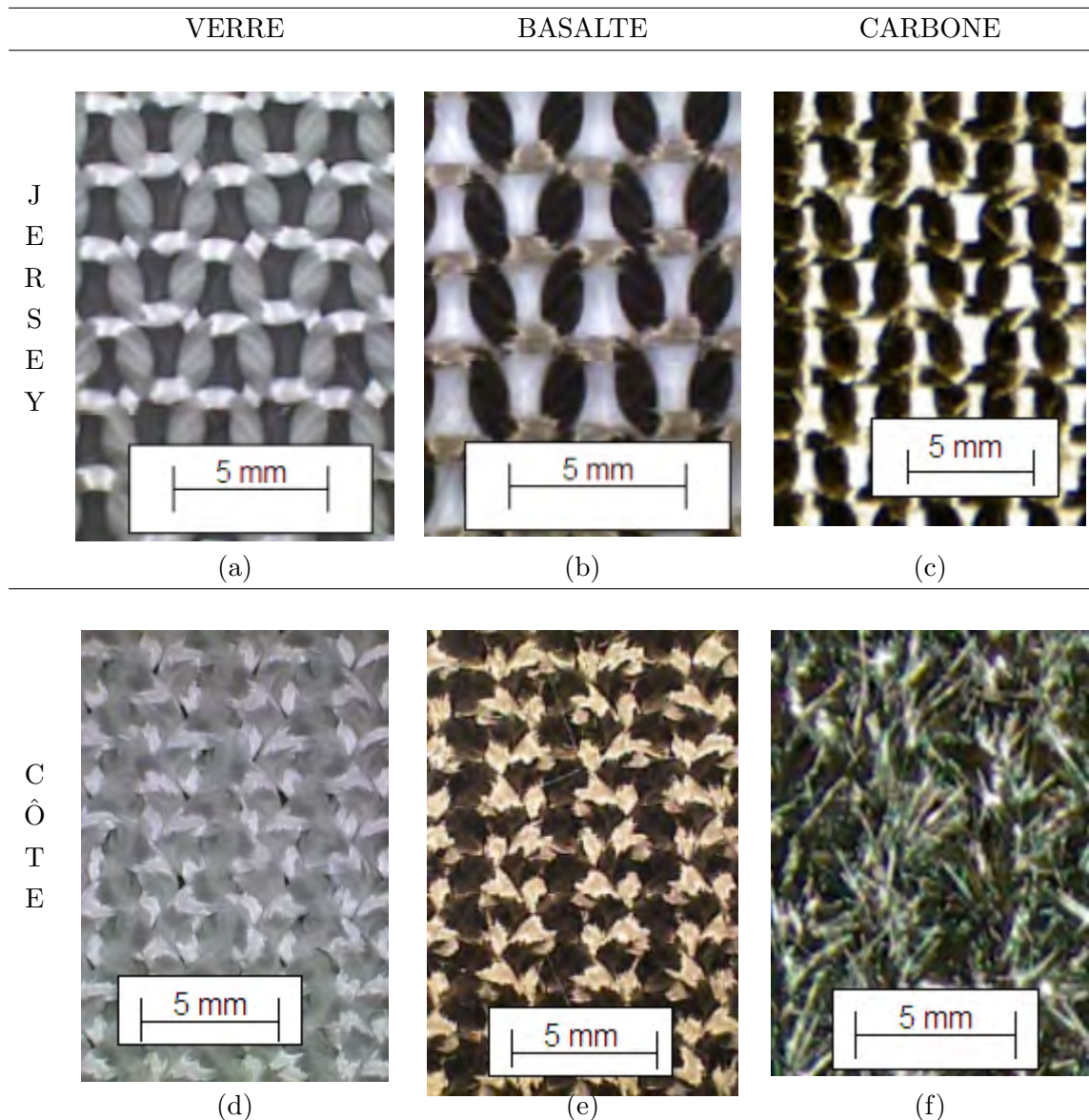


Figure 2.4 – Photos des tricots jersey et côte en fibres de verre (a) et (d), de basalte (b) et (e) et de carbone (c) et (f).

2.1.2.2 Éprouvettes

Les tricots sont directement élaborés aux dimensions de l'éprouvette d'essai, c'est à dire 300 mm de hauteur et 100 mm de largeur. La figure 2.5 présente les éprouvettes de traction colonne et de traction rangée. Pour éviter le démaillage, La finition des éprouvettes s'effectue en rajoutant des rangées de fil textile pour habillage. Pour les éprouvettes de traction rangée, des rangées de fil élastique ont été tricotées sur les bords de l'éprouvette pour éviter le démaillage tout en étant peu intrusives. Les tricots de contexture jersey, qui ne possèdent que des mailles avant, s'enroulent naturellement sur eux mêmes. Cette caractéristique, ajoutée à la déformabilité du tricot entraîne des difficultés expérimentales de mesure et de mise en place des éprouvettes.

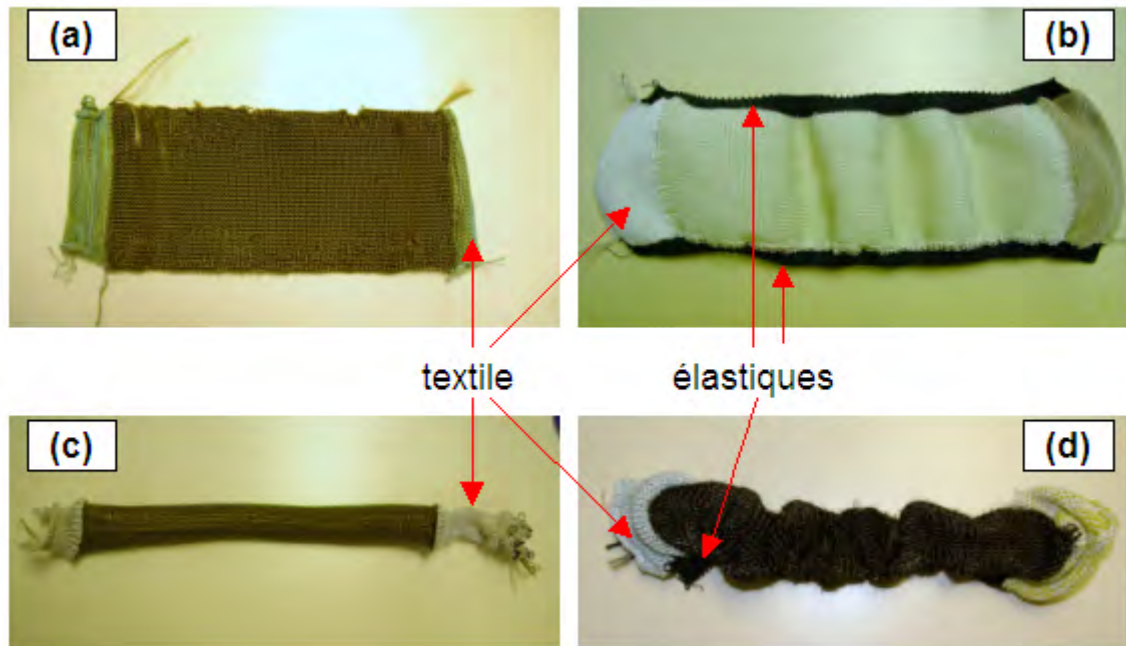


Figure 2.5 – Photos des éprouvettes du tricot côte en traction colonne (a) et rangée (b) et du tricot jersey en traction colonne (c) et rangée (d)

Les caractéristiques des éprouvettes de traction colonne et de traction rangée sont données dans les tableaux 2.2 et 2.3. Les tricots sont caractérisés par leur épaisseur e , leur masse surfacique m_{tricot} et par les caractéristiques géométriques d'une maille, en considérant toutes les mailles identiques dans le tricot. La hauteur h et la largeur b de la maille, représentées sur la figure 2.6, correspondent à la mesure de la projection de la maille dans le plan du tricot. Elles sont respectivement déterminées à partir de la longueur du textile divisée par le nombre de rangées de mailles et de la largeur du textile divisée par le nombre de colonnes. Les dimensions du tricot sont mesurées selon les normes NF G 07-103 et NF G07-114 dédiées à la mesure de dimension d'une pièce de tissu. La longueur de textile doit être mesurée parallèlement à la lisière (respectivement colonne du tricot) et la largeur doit être mesurée perpendiculairement à la lisière (respectivement parallèlement à la direction rangée) en posant le textile à plat. Ces mesures doivent être effectuées avec précaution du fait de la grande déformabilité des tricots et de l'enroulement des tricots simple fonture. La longueur de fil par maille L_f est calculée à

partir de la densité linéaire Dy de la mèche et de la masse du tricot en utilisant l'équation 2.3.

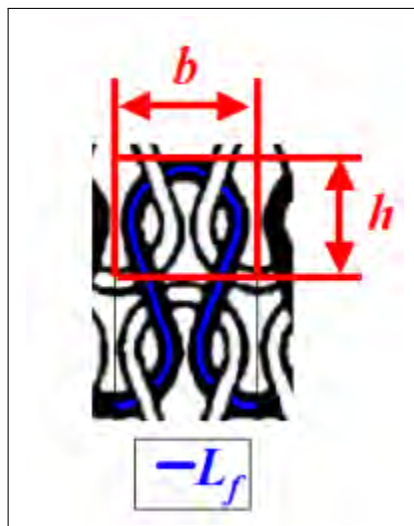


Figure 2.6 – Caractéristiques géométriques d'une maille

$$L_f = \frac{m_t}{Dy} \quad (2.3)$$

L'épaisseur du tricot est mesurée en s'inspirant de la norme NF EN ISO 5084 (Détermination de l'épaisseur des textiles et produits textiles : épaisseur mesurée sous une pression précisée dans les documents relatifs aux articles concernés). La pression choisie est de $0,005 \text{ MPa}$ selon les conditions d'essai données par Bueno et al. [82]. La mesure est effectuée avec un comparateur sur un marbre et le tricot est placé sous un empilement de cales rectifiées dont la surface d'appui est de $20,16 \text{ cm}^2$ et la masse de $1027,52 \text{ g}$. La valeur retenue est une moyenne de trois mesures prises à trois endroits de l'éprouvette. Le calcul de la masse surfacique du tricot ms_{tricot} s'effectue selon la norme NF G 07-115 consistant à mesurer la longueur, la largeur et la masse de l'éprouvette. L'ensemble des mesures est effectué sur chacune des éprouvettes avant essai et les valeurs indiquées sont les moyennes des valeurs mesurées et calculées pour chaque éprouvette de même texture, même nature de fibre et même direction de sollicitation.

Pour une texture donnée, les caractéristiques géométriques des mailles des tricots réalisés à partir des fibres de différentes natures sont proches. Les textures côte sont plus épaisses que les textures jersey, leur densité surfacique est plus élevée et les dimensions de leurs mailles sont plus petites. Les dimensions des mailles des éprouvettes de traction colonne et rangée diffèrent du fait d'un retour élastique de la maille différent après tricotage selon le nombre de colonnes et de rangées.

	ÉPROUVETTES DE TRACTION COLONNE					
	CÔTE			JERSEY		
	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone
h (mm)	1,80	1,70	2,15	2,65	2,65	2,75
b (mm)	1,65	1,70	1,70	4,35	4,40	4,10
L_f (mm)	10,40	9,75	9,05	13,90	13,10	14,95
e (mm)	4,05	3,95	4,25	1,60	1,45	1,50
$m_{stricot}$ ($g.m^{-2}$)	2138	2043	986	726	689	568

Tableau 2.2 – Caractéristiques des éprouvettes de traction colonne de côte et jersey

	ÉPROUVETTES DE TRACTION RANGÉE					
	CÔTE			JERSEY		
	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone
h (mm)	1,55	1,80	1,95	2,65	2,65	2,65
b (mm)	1,80	1,70	1,50	3,80	3,85	4,00
L_f (mm)	11,65	9,55	10,75	13,30	12,00	12,50
e (mm)	3,90	4,20	3,75	1,60	1,60	1,55
$m_{stricot}$ ($g.m^{-2}$)	2465	2106	1554	805	787	533

Tableau 2.3 – Caractéristiques des éprouvettes de traction rangée de côte et jersey

2.2 Essais de traction uni-axiale

2.2.1 Moyens et procédure

Aucune norme ne concerne les essais de traction uniaxiale sur tricots en fibres techniques. Les paramètres d'essais sont inspirés de la norme NF EN ISO 4606 [83] qui concerne les essais de traction uniaxiale de tissus en fibres de verre.

2.2.1.1 Equipement

Le montage d'essai est présenté à la figure 2.7. Les essais sont réalisés sur une machine électromécanique Instron 5800R :

- Capacité de la cellule : ± 30 kN
- Course utile : 1135 mm
- Précision de la charge : $\pm 0,5$ % de la pleine échelle
- Précision du déplacement : $\pm 0,01$ mm de l'affichage
- Rigidité axiale : 100 kN/mm

Des mors pneumatiques INSTRON 2712-017 équipés de mordaches INSTRON 2702-104 garnis d'un élastomère de 150 mm de large et 50 mm de hauteur sont utilisés pour permettre d'appliquer une pression uniforme sur toute la largeur de l'éprouvette et éviter son glissement. La charge maximale d'utilisation des mors est de 5 kN.

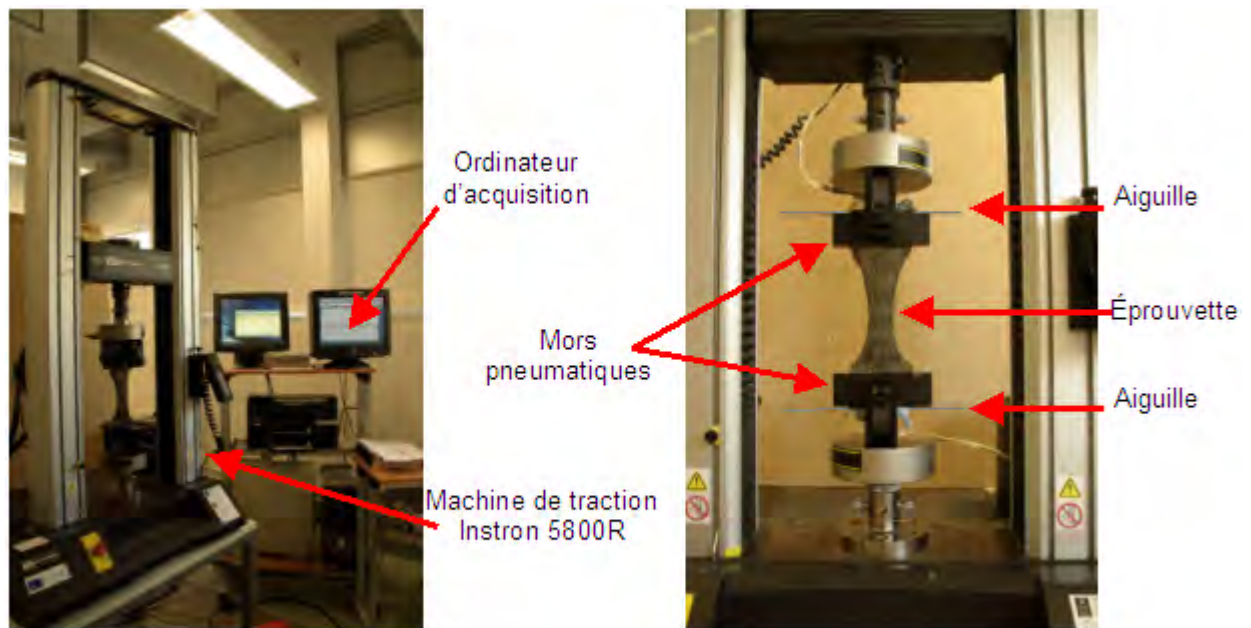


Figure 2.7 – Montage de l'essai de traction sur tricots secs

2.2.1.2 Procédure

La distance entre les mors est fixée à 200 mm. La mise en place de l'éprouvette sur le montage nécessite un soin particulier afin de ne pas induire de déformation avant essai. Des aiguilles sont préalablement introduites dans la largeur des éprouvettes pour faciliter leur mise en place dans les mors (Figure 2.8). Aucune prétention n'est appliquée au tricot avant le début de l'essai et les tricots ne sont pas tendus au début de l'essai.

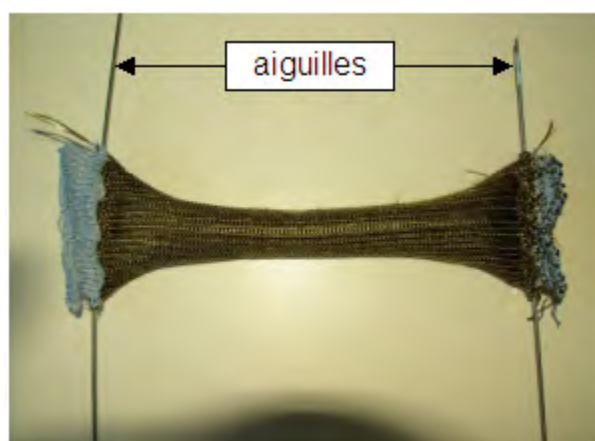


Figure 2.8 – Photo d'une éprouvette de traction de tricot sec

Les essais sont pilotés en déplacement de la traverse avec une vitesse constante de 50

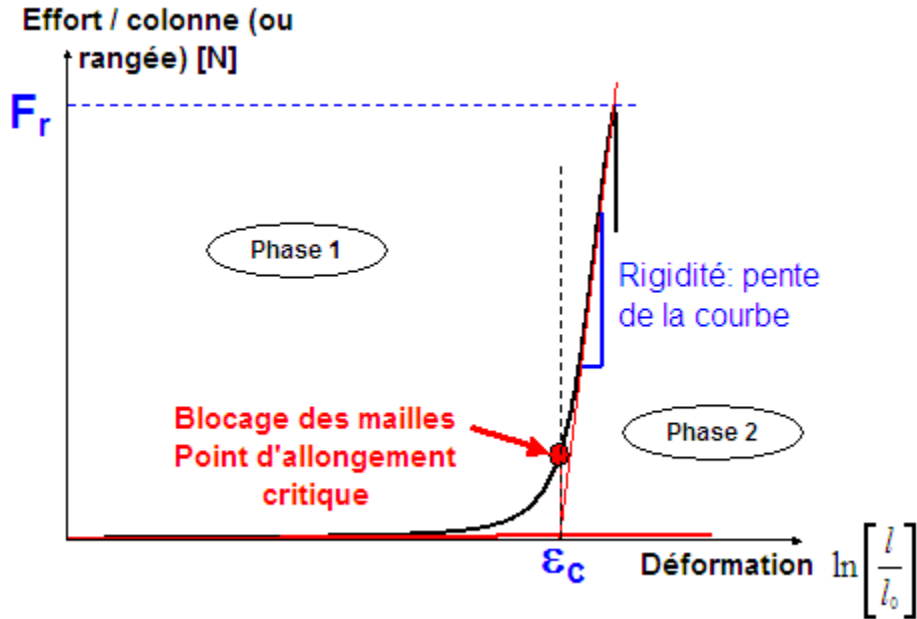


Figure 2.9 – Courbe d'effort-déformation d'un tricot sec sollicité en traction

$mm.min^{-1}$. Des études antérieures [84] ont montré que la vitesse de déplacement de la traverse ainsi que la largeur des éprouvettes avaient une influence négligeable sur le comportement du tricot.

2.2.2 Exploitation des résultats

La courbe type d'un essai de traction sur tricot sec est présentée à la figure 2.9. Les résultats sont donnés en effort rapporté à une colonne ou une rangée de mailles en fonction de la déformation. Du fait des grandes déformations atteintes, la déformation rationnelle a été choisie pour représenter les résultats. Il faut cependant noter qu'il s'agit d'une déformation macroscopique de la structure et en aucun cas d'une déformation physique du matériau. Puisque les tricots ne sont pas tendus au début de l'essai, l'origine des courbes est recalée au niveau de la reprise d'effort représentée sur la figure 2.10. Dans la section 1.3.2, le comportement du tricot sec en traction uniaxiale a été décomposé en deux grandes étapes successives : une déformation structurale du tricot suivi d'une reprise des efforts par les fibres séparées par une zone de transition pendant laquelle le blocage des mailles se produit.

La déformabilité structurale des tricots est caractérisée par une déformation critique ϵ_c au blocage des mailles. Elle correspond à la déformation déterminée par l'intersection entre les droites de chacune des deux parties linéaires de la courbe. La deuxième étape peut être caractérisée par la rigidité du tricot après blocage des mailles (pente de la courbe) et par la résistance à la rupture F_r .

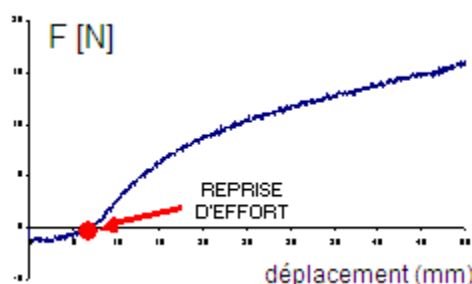


Figure 2.10 – Représentation du point de reprise d'effort sur la courbe d'effort-déplacement tracée à partir des données brutes

2.3 Comportement des tricots secs simples

Chaque essai a été réalisé entre 3 et 6 fois afin de vérifier la répétabilité et de pouvoir sélectionner un comportement représentatif. L'ensemble des courbes est reporté dans l'annexe B. Les échantillons sont désignés par une référence indiquant le type d'essai (TC pour traction colonne et TR pour traction rangée), la nature de la fibre (VER pour le verre, BAS pour le basalte et CAR pour le carbone) et la contexture de l'échantillon (J pour le jersey et C pour la côte). Les indications sont séparées par un tiret -. Le numéro de l'essai -i est indiqué après la désignation de l'éprouvette.

Exemple : TR - BAS - J - 2 correspond au 2^{me} essai de **Traction Rangée** sur un **Jersey** en fibres de **Basalte**.

Une courbe représentative de chaque essai est choisie pour la discussion. Ces courbes sont présentées sur la figure 2.11. Dans le cas des essais de traction rangée effectués sur les tricots côte, les capacités de la machine en déformation ont été dépassées, ce qui explique que le blocage des mailles n'a pas été atteint. Avant d'étudier l'influence de la nature des fibres, de la contexture et de la direction de sollicitation sur le comportement des tricots secs, le comportement général d'un tricot est analysé.

La répétabilité des essais est analysée figure 2.12. La figure 2.12.a présente la valeur moyenne et l'écart-type de l'effort appliqué pour une déformation donnée obtenu pour chaque type d'essai et la figure 2.12.b présente la valeur moyenne et l'écart-type de la déformation obtenue pour un effort donné. La première figure présentent des valeurs issues de la première phase du comportement, où la déformation augmente fortement sous de faibles efforts et la seconde présente des valeurs issues de la seconde phase, où l'effort augmente rapidement avec la faible déformation. Une certaine dispersion dans les résultats est observée. Celle-ci est due principalement à la mise en place de l'éprouvette dans les mors. La dispersion observée semble plus importante dans la première phase du comportement, cependant elle concerne des efforts très faibles inférieurs à 1% de la valeur de l'effort à la rupture.

2.3.1 Comportement général d'un tricot sec

Quelle que soit la nature de la fibre, la contexture, ou la direction de sollicitation, le comportement général d'un tricot sec en traction est identique. Ce comportement est complexe et différents phénomènes entrent en jeu. Pour déterminer ces phénomènes, la courbe est décomposée en 5 phases successives. L'exemple donné à la figure 2.13 correspond à la courbe effort-déformation d'un essai de traction colonne opéré sur un tricot côte. Les graphiques

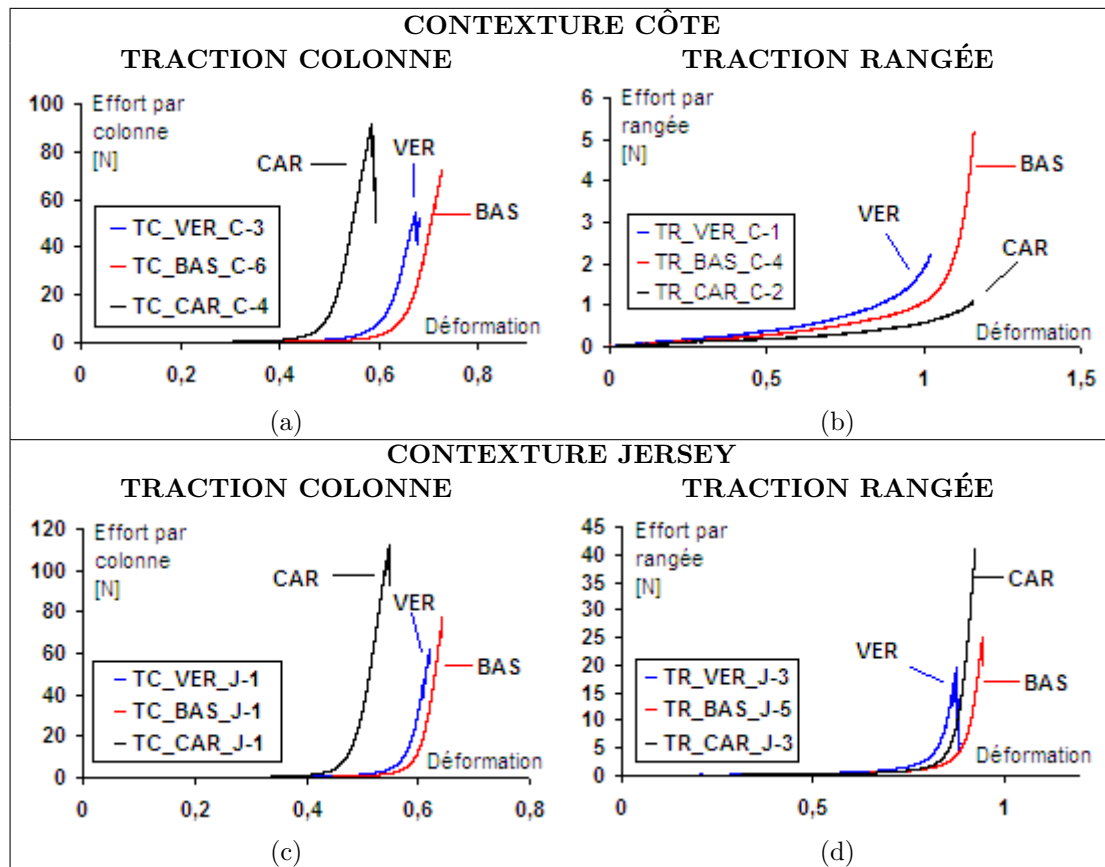


Figure 2.11 – Courbe d'effort-déformation des tricots secs simples

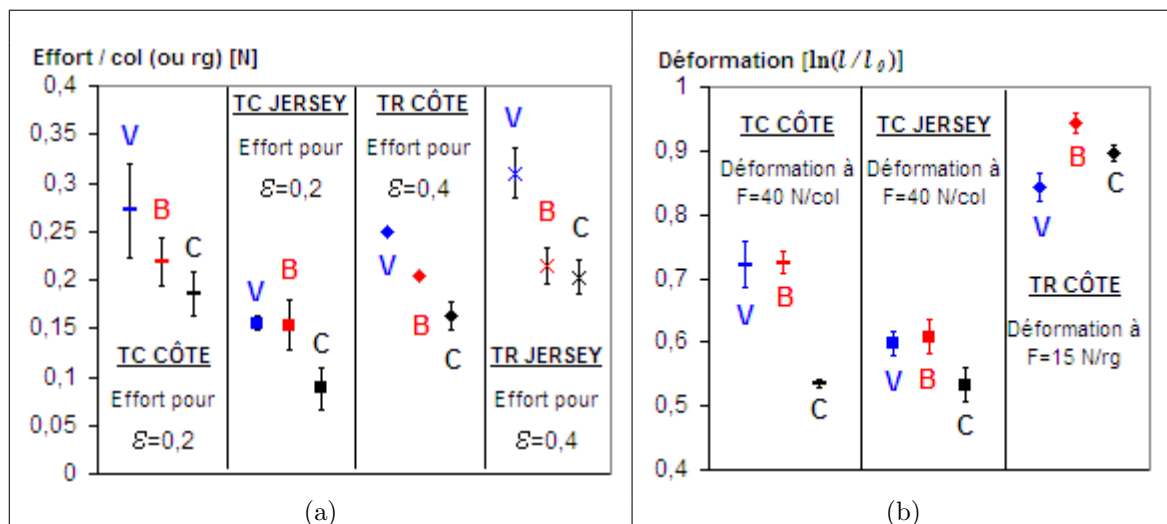


Figure 2.12 – Répétabilité de la 1ère et de la seconde phase

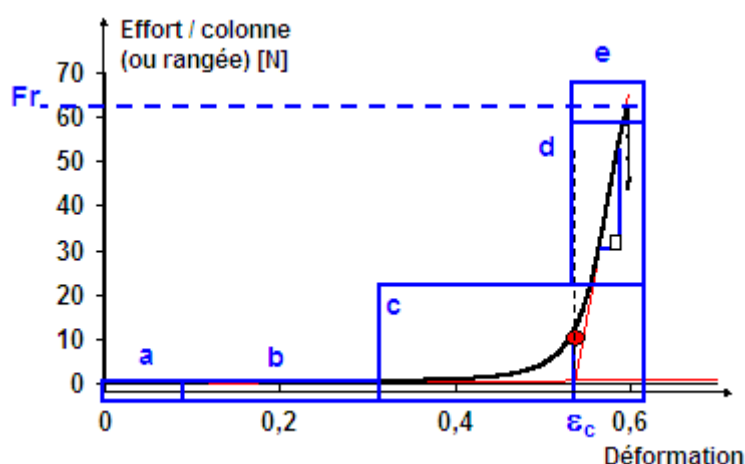


Figure 2.13 – Courbe d'effort-déformation d'un tricot sec sollicité en traction

présentées à la figure 2.14 présentent un agrandissement de chacune des cinq phases.

Phase a (Figure 2.14.a) : Au début de l'essai, les mailles glissent les unes par rapport aux autres et le début de la courbe correspond au frottement entre les mèches des mailles adjacentes.

Phase b (Figure 2.14.b) : La deuxième partie de la courbe est linéaire de faible pente et correspond à une importante déformation sous de faibles charges. Le tricot se comporte comme une structure et la déformation est essentiellement due à un changement dans la configuration de la maille. La maille s'allonge dans la direction de sollicitation et rétrécit dans la direction transverse. Les mailles glissent entre elles avec frottement au niveau des croisements. La maille est essentiellement soumise à des efforts de flexion dans la mèche. Dans le cas de la traction colonne, les têtes et pieds des mailles se courbent au niveau des croisement tandis que les jambes se tendent. En traction rangée, les têtes et les pieds des mailles se tendent, les mailles glissent entre elles et le croisement entre les mailles adjacentes se déplace des pieds vers les jambes des mailles (Figure 2.15).

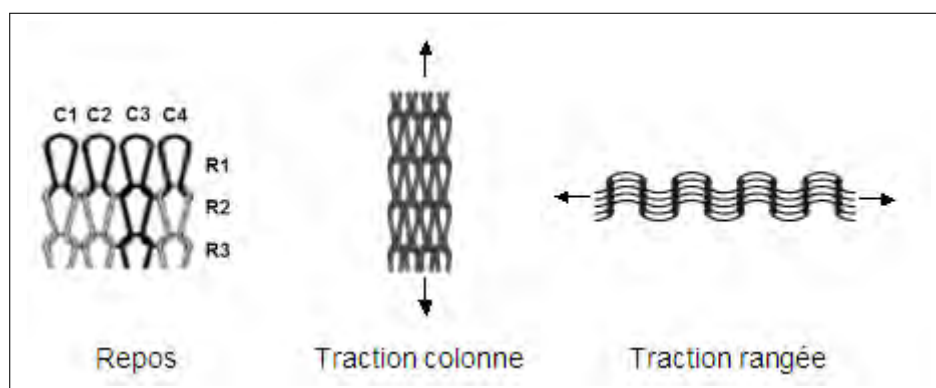


Figure 2.15 – Configuration du tricot jersey au repos, en traction colonne et en traction rangée

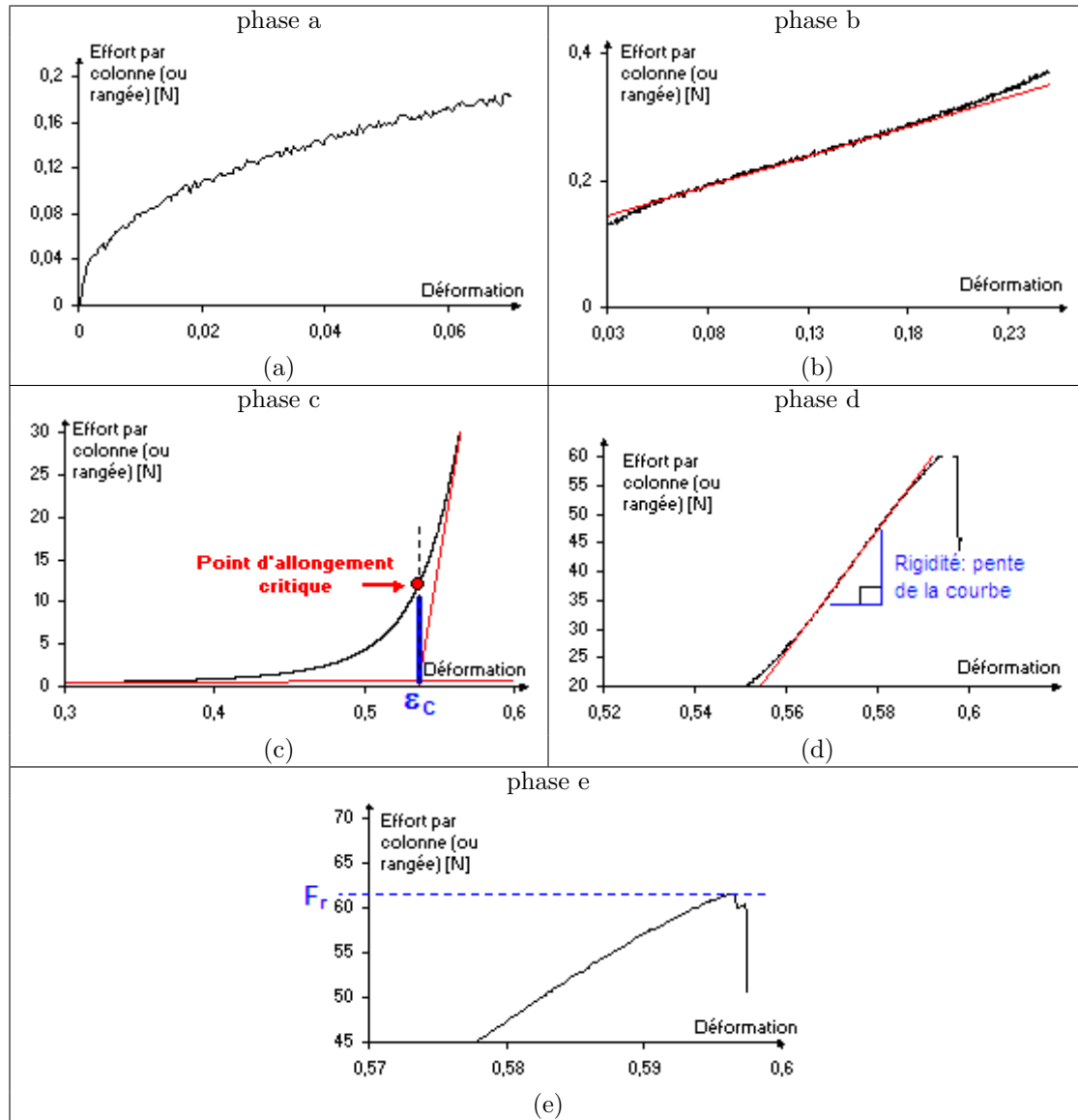


Figure 2.14 – Agrandissement des phases a, b, c, d et e de la courbe de comportement en traction d'un tricot sec

Phase c (Figure 2.14.c) : La troisième phase du comportement correspond à la phase de transition entre la déformation structurale du tricot et la reprise des efforts par les fibres. Cette phase débute en traction colonne lorsque les pieds d'une même maille entrent en contact et en traction rangée, lorsque les pieds de la maille d'une rangée entrent en contact avec la tête de la maille de la rangée suivante. Dans les deux cas, la maille continue de se comporter comme une structure et la maille s'agrandit dans la direction de sollicitation. Les mailles glissent entre elles et la forme de la section du fil se modifie et s'aplatit avec une réorganisation des fibres dans la mèche sous l'effet de compression locale, ce qui se traduit par une augmentation de la rigidité macroscopique du tricot.

Phase d (Figure 2.14.d) : La quatrième phase est linéaire avec une rapide augmentation de la charge sous faible accroissement de déformation. La maille est totalement bloquée et les efforts sont transmis aux fibres qui sont alors sollicitées en traction au niveau des jambes des mailles et en cisaillement au niveau des croisements entre les mailles adjacentes. Il ne s'agit plus d'une déformation macroscopique de la structure mais d'une déformation physique du matériau.

Phase e (Figure 2.14.e) : La dernière phase correspond à une perte de la linéarité de la courbe qui correspond à l'endommagement successif des fibres. Cette phase amène à la rupture finale qui a lieu par cisaillement au croisement des mailles adjacentes et provoque le démaillage du tricot (Figure 2.16).

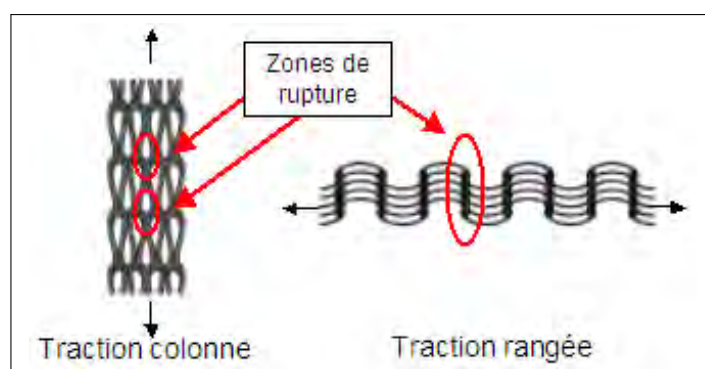


Figure 2.16 – Zones de rupture des tricots secs jersey

Pour caractériser le comportement des tricots secs, deux grandes étapes sont dissociées et étudiées séparément : la déformation structurale du tricot, également appelée déformation macroscopique et la tenue mécanique du tricot après blocage des mailles.

2.3.2 Comportement structural du tricot

Dans cette section, l'étude est consacrée exclusivement à la déformation macroscopique du tricot sec. Comme précisé dans la section 1.3.2 du chapitre 1 et à la section 2.3.1, le comportement structural du tricot correspond au changement de forme des mailles et confère aux tricots leur grande déformabilité. L'observation des courbes de comportement permet de caractériser qualitativement la déformabilité des tricots, et la mesure de la déformation

critique des mailles ϵ_c sur les courbes effort-déformation selon la méthode présentée à la section 2.2.2 permet de caractériser quantitativement la déformabilité structurale des tricots secs. Différents paramètres peuvent entrer en jeu dans le comportement des tricots secs. L'influence de la contexture, de la direction de sollicitation et enfin de la nature des fibres sont étudiées successivement.

2.3.2.1 Influence de la contexture

Les figures 2.17 et 2.18 présentent les courbes d'effort déformation respectivement pour les essais de traction colonne et de traction rangée pour les trois natures des fibres et les deux contextures.

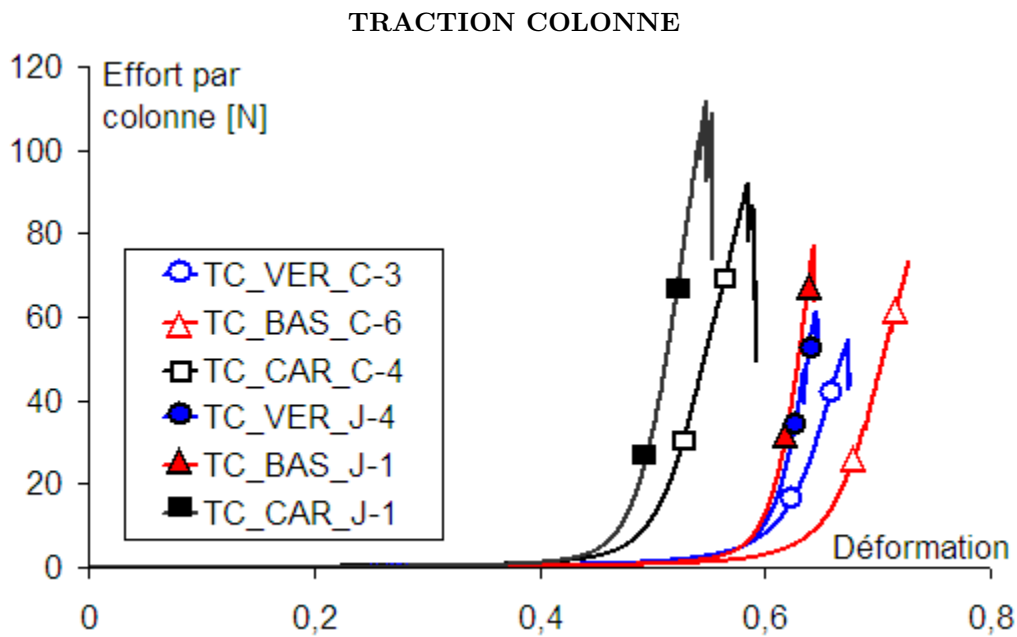


Figure 2.17 – Courbes d'effort-déformation des tricots côte et jersey en traction colonne

L'observation des courbes de comportement montrent une influence de la contexture sur la déformabilité macroscopique du tricot sec. Quelle que soit la nature de la fibre, les contextures côte atteignent des niveaux de déformations plus importantes que les contextures jersey, particulièrement dans la direction rangée. La déformation structurale du tricot correspond à une modification géométrique de la maille. La déformabilité de la maille dépend donc de ses caractéristiques géométriques initiales. Celles-ci ont été préalablement définies comme étant la hauteur (h), la largeur (b) et la longueur de fil (L_f). Pour une dimension de maille donnée, plus la longueur de fil est importante, plus la maille a une capacité à se déformer. Proportionnellement aux dimensions de la maille ($b \times h$), les tricots côte possèdent une longueur de fil (L_f) plus importante que les jersey (tableau 2.4). Cette caractéristique provient de leur structure. L'observation de la représentation 3D de chacune des contextures (Figure 2.19) montre que pour la réalisation des tricots côte, une longueur de fil par maille plus importante est nécessaire pour passer d'une maille avant à une maille arrière sur une même rangée.

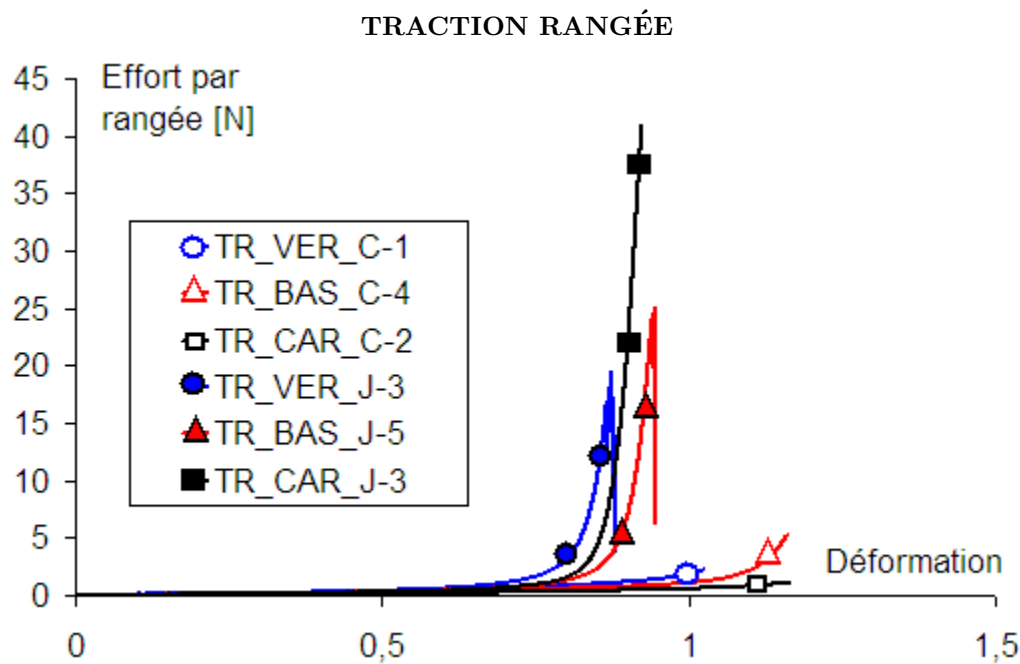


Figure 2.18 – Courbes d'effort-déformation des tricots côte et jersey en traction rangée

	Traction colonne					
	Côte			Jersey		
	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone
	$\frac{L_f}{b.h}$	0,34	0,35	0,27	0,09	0,09
	Traction rangée					
	Côte			Jersey		
	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone
	$\frac{L_f}{b.h}$	0,35	0,33	0,34	0,10	0,10

Tableau 2.4 – Valeurs donnant le rapport entre la longueur de fil par maille (L_f) et les dimensions de la maille ($b \times h$)

Les histogrammes présentés à la figure 2.20 reportent les déformations critiques des essais de traction colonne et rangée. Les valeurs correspondent à la moyenne des déformations mesurées pour chaque essai et la barre d'erreur à l'écart-type.

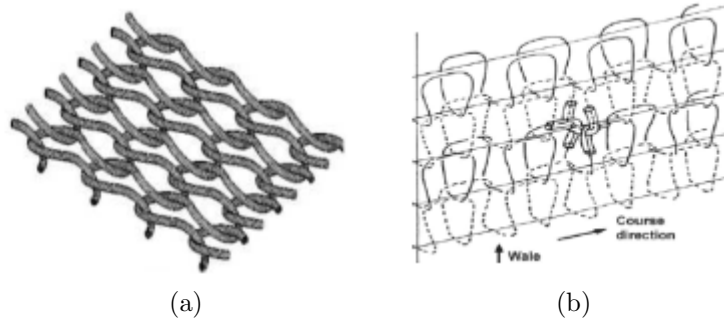


Figure 2.19 – Représentation 3D des contextures (a) jersey et (b) côte

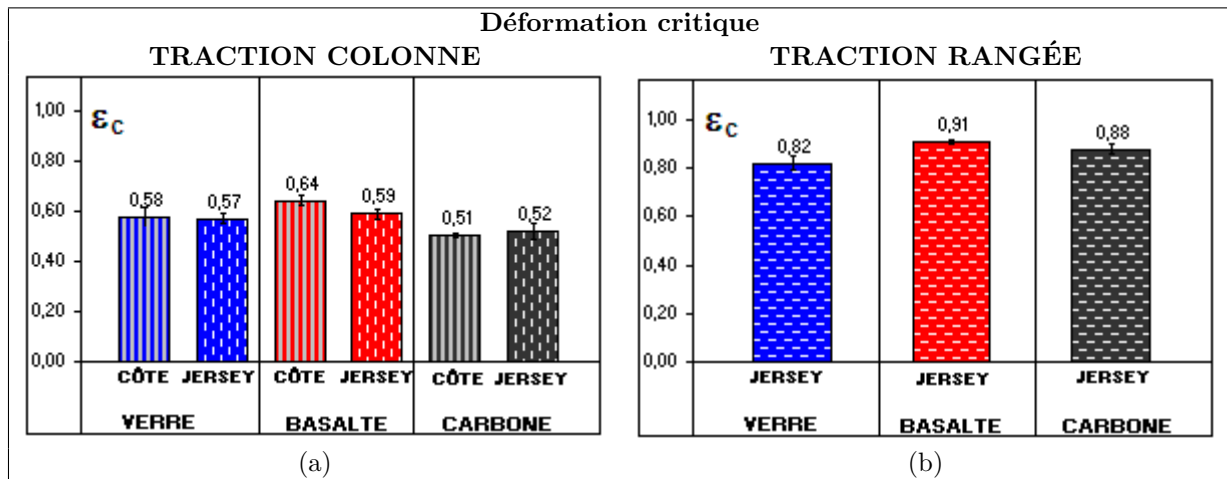


Figure 2.20 – Histogrammes des déformations au blocage des mailles (a) en traction colonne et (b) en traction rangée

La déformation critique correspond à la valeur de la déformation à l'intersection entre les droites de chacune des deux parties linéaires de la courbe (Figure 2.13). De ce fait, cette valeur ne peut être mesurée sur les courbes de traction rangée des contextures côte. Dans le cas de la traction colonne, les valeurs de déformation critique de la contexture côte sont effectivement plus importantes pour les tricots en fibres de basalte, cependant celles des contextures côte et jersey sont équivalentes pour les tricots en fibres de verre et de carbone. La figure 2.21 donne un agrandissement des courbes dans la zone de déformation structurale.

Les courbes des contextures côte se retrouvent généralement au dessus de celles des contextures jersey au début de l'essai. Cette tendance s'inverse dans la zone de transition entre le comportement structural et la reprise d'effort par les fibres. Les courbes des tricots jersey présentent un rayon de courbure plus faible que celles des tricots côte. Au début de l'essai, le frottement est plus important pour les contextures côte qui présentent des surfaces de contact entre les mèches plus importantes du fait de leur densité de mailles plus importante. Le rayon de courbure plus faible des courbes des contextures jersey observé au niveau de la zone de transition indique que les tricots jersey atteignent plus rapidement le blocage des mailles que

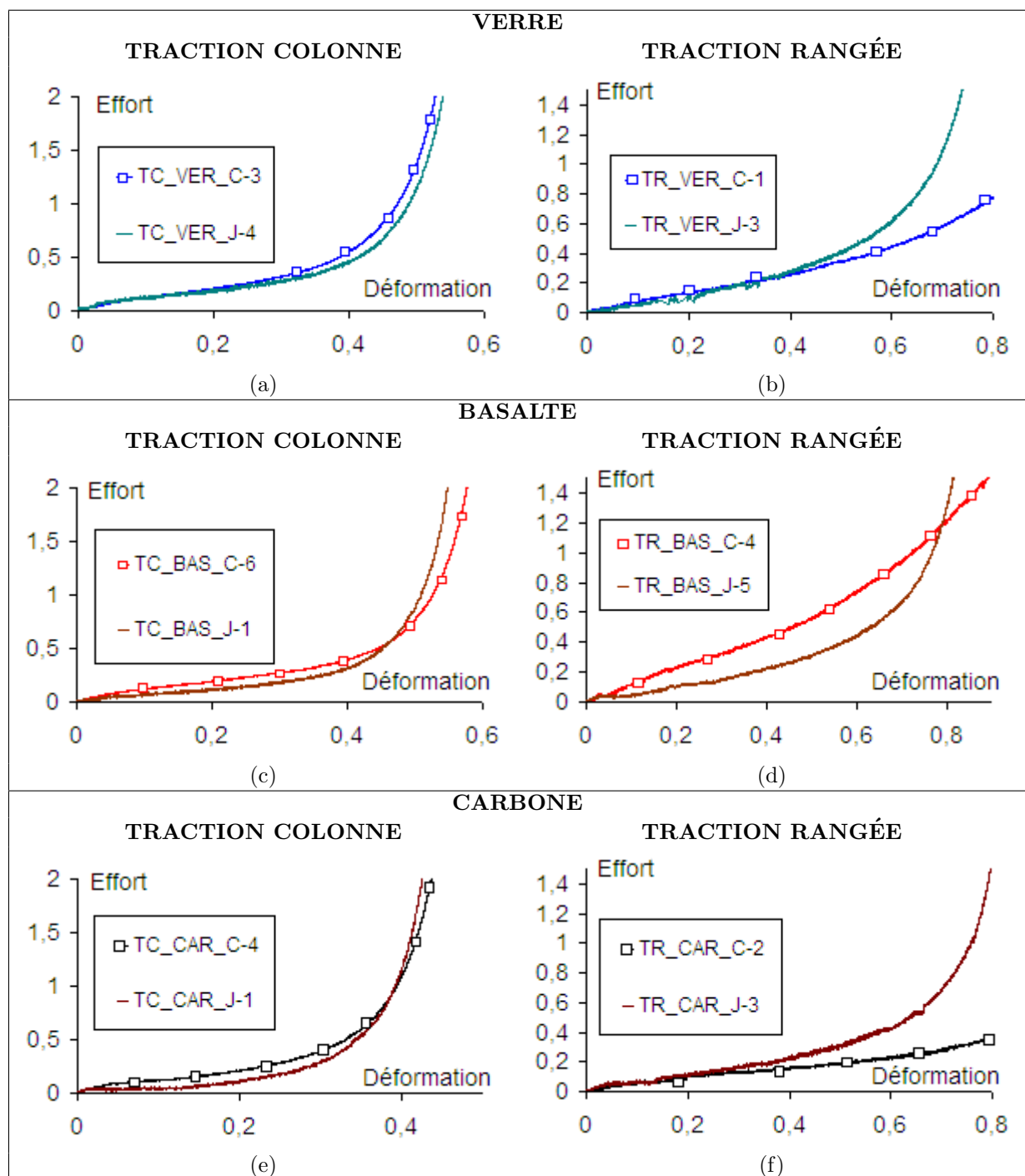


Figure 2.21 – 1^{re} étape des courbes d'effort déformation des tricotés secs simples en fonction de la contexture

les contextures côte du fait de leur plus petite proportion de longueur de fil par maille.

2.3.2.2 Influence de la direction de sollicitation

Les figures 2.22 et 2.23 présentent les courbes d'effort-déformation des tricots côte et jersey en fonction des directions de sollicitation. Les résultats montrent une importante anisotropie des tricots avec des niveaux de déformation beaucoup plus élevés dans la direction rangée quelque soit la contexture ou la nature de fibre. L'histogramme de la figure 2.24 confirme cette observation quantitativement en donnant les valeurs des déformations critiques pour les tricots jersey dans les deux directions de sollicitation et les différentes natures de fibres.

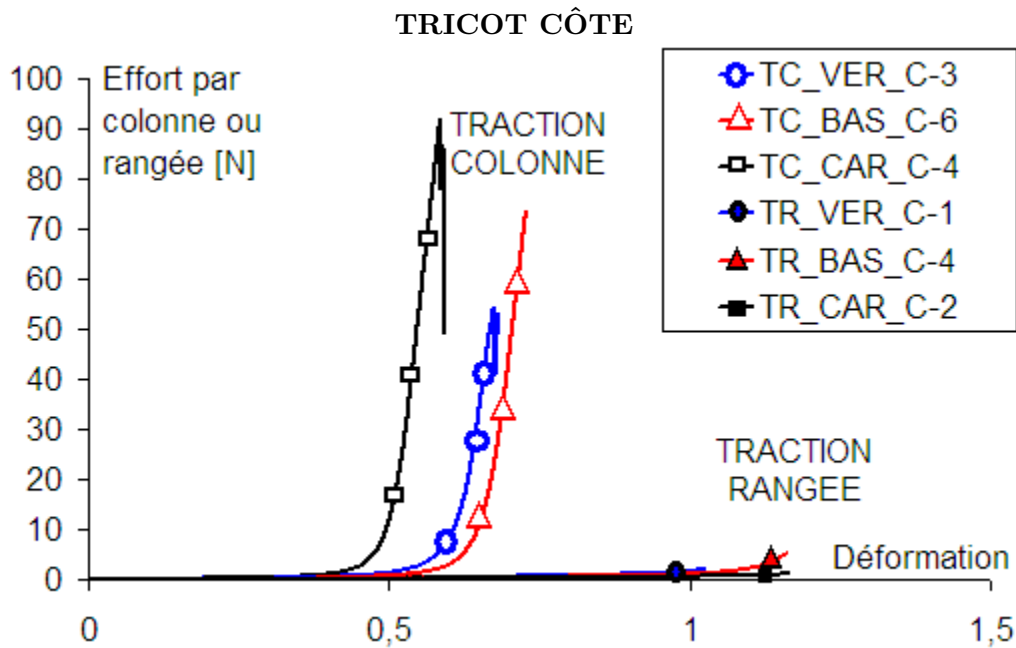


Figure 2.22 – Courbes d'effort-déformation des tricots côte

Cette anisotropie s'explique par la structure du tricot à mailles cueillies (Figure 2.25) et son procédé d'élaboration. La mise en œuvre des tricots à mailles cueillies se fait par l'entrelacement des mailles dans la direction colonne. La figure 2.26 présente une forme approchée de la maille bloquée en traction colonne et en traction rangée. Dans le cas d'une traction colonne, le blocage des mailles a lieu lorsque les pieds d'une même colonne sont en contact et que les jambes des mailles sont tendues. La maille garde sa forme de boucle mais est plus allongée. Dans le cas de la traction rangée, les mèches des différentes rangées glissent entre elles jusqu'à ce que les pieds de la maille du rang R1 touchent la tête de la maille du rang R3 (Figure 2.25). Les mèches des différentes rangées s'allongent dans la direction rangée, la maille perd sa forme de boucle et la mèche prend la forme d'un fil ondulé. Le blocage des mailles a donc lieu plus tardivement.

2.3.2.3 Influence de la nature de la fibre

Les résultats proposés précédemment dans les figures 2.11, 2.17 et 2.18 montrent des différences dans les niveaux de déformation atteints avec les différentes natures de fibres. Dans

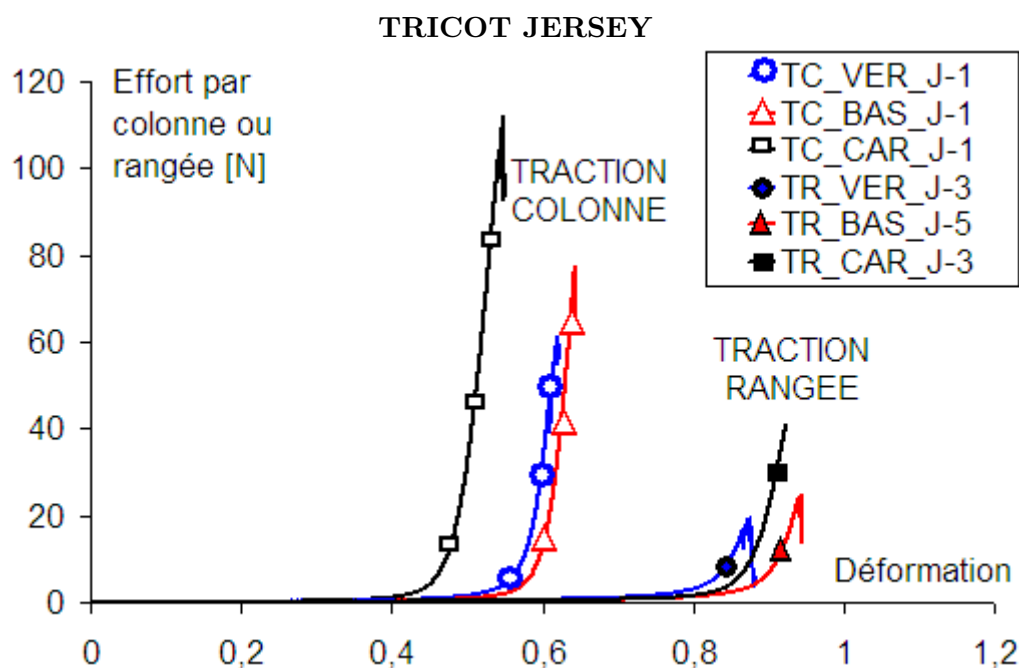


Figure 2.23 – Courbes d'effort-déformation des tricots jersey

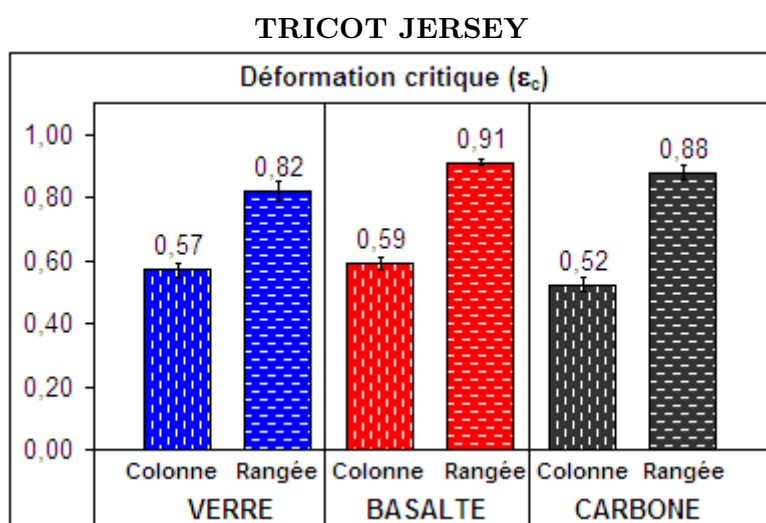


Figure 2.24 – Histogramme de la déformation structurale critique des tricots jersey

la phase de déformation structurale du tricot sec, la déformation est essentiellement due à un changement de configuration de la maille combinée à un glissement des mailles les unes par rapport aux autres avec une réorganisation des fibres dans la mèche. La caractéristique liée à la nature de la fibre intervenant dans cette phase concerne la rigidité en flexion de la mèche. Un agrandissement de la première phase du comportement est donné dans la figure 2.27. Au début de l'essai les courbes se confondent. Cette première phase, qui correspond à la

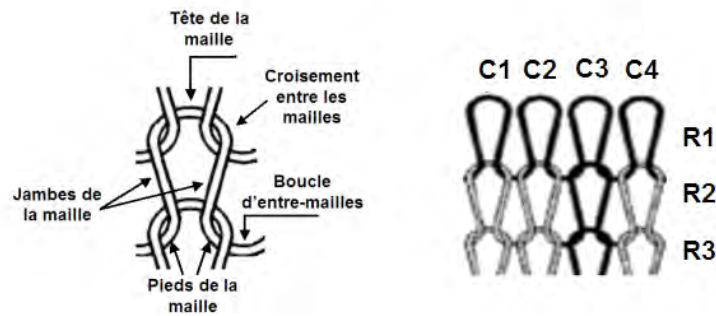


Figure 2.25 — *Structure des tricots à mailles cueillies*



Figure 2.26 — *Forme d'une maille en traction (a) colonne et (b) rangée*

phase a de la courbe décrite à la section 2.3.1, concerne essentiellement au frottement entre les mailles adjacentes, ce qui explique que les courbes se confondent. Lors de la phase suivante correspondant à une partie linéaire de la courbe, la déformation est essentiellement due à un changement de configuration de la maille dont la mèche est soumise à des efforts de flexion. Les courbes des tricots en fibres de verre ont tendance à être au dessus de celles en fibres de basalte et de celles en fibres de carbone. Cette tendance est visible sur le graphique de la figure 2.12.a où est reportée la valeur moyenne de l'effort mesuré à une déformation donnée prise lors de cette étape. Ces résultats sont cohérents avec les rigidités des mèches en flexion calculées (Tableau 2.1). Cependant, étant donné les faibles efforts en jeu, la nature de fibre influence peu le comportement structural du tricot.

La figure 2.28 présente les valeurs des déformations critiques en fonction des natures de la fibre. Quelles que soient la contexture ou la direction de sollicitation, Les tricots en fibre de basalte atteignent les niveaux de déformation les plus importants. En traction colonne, les tricots en fibres de carbone atteignent les niveaux de déformation les plus faibles. En traction rangée, ce sont les tricots en fibres de verre qui atteignent les plus faibles niveaux de déformation.

La déformabilité structurale du tricot est liée à la géométrie de la maille, or les géométries de mailles sont proches pour une même contexture et une même direction de sollicitation. D'autres paramètres sont donc à prendre en compte. Une caractéristique liée à la nature de la fibre concerne le diamètre des filaments qui composent la mèche (Tableau 2.1). Les fibres de carbone sont les plus fines et les fibres de verre sont les plus épaisses. Au cours de la

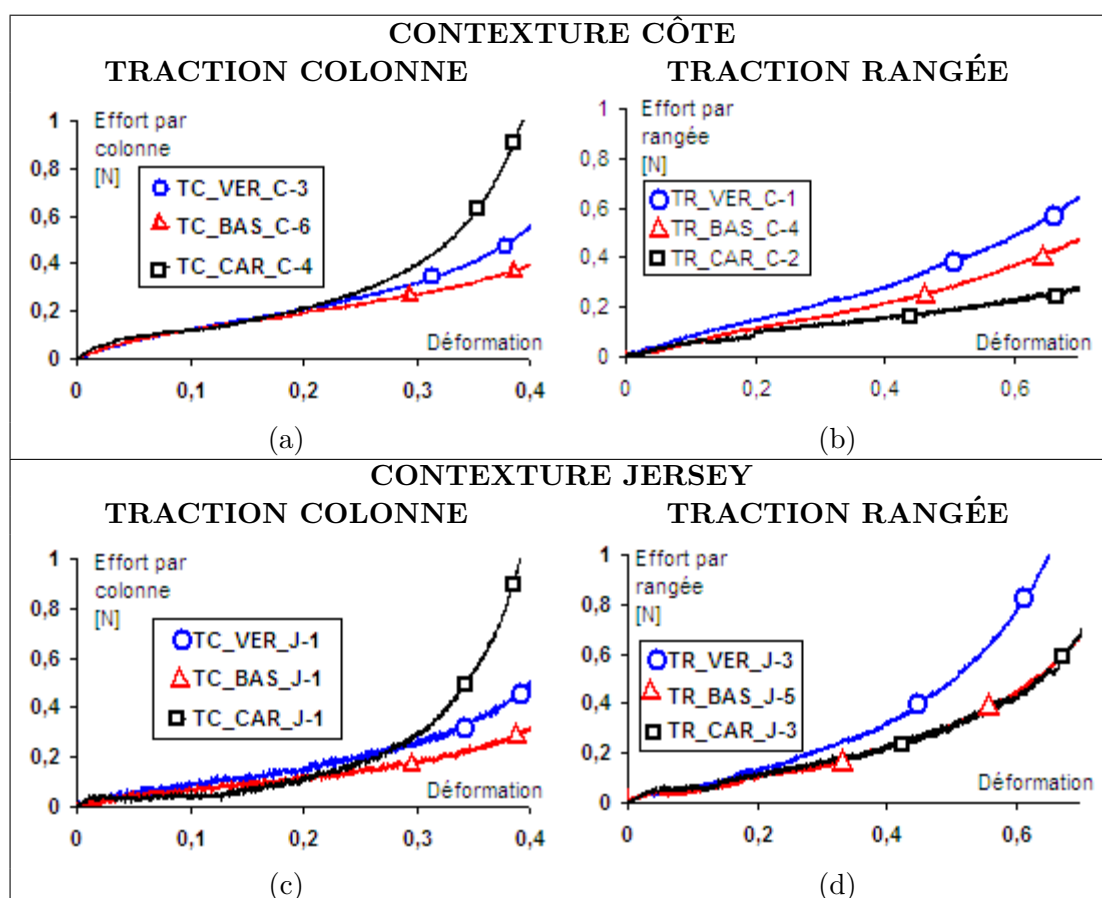


Figure 2.27 – Comparaison de la 1^{re} étape de la courbe d'effort déformation des tricots secs simples en fonction de la nature de fibre

déformation, les mailles glissent les uns par rapport aux autres et la forme de la section de la mèche se modifie et s'aplatie avec une réorganisation des fibres dans la mèche sous l'effet d'une compression locale. Les filaments se déplacent donc les uns par rapport aux autres. La section plus élevée des fibres de verre limite la capacité des filaments à se déplacer les uns par rapport aux autres dans la mèche et donc la section de la mèche à se modifier, ce qui entraîne un blocage des mailles plus rapide. Dans le cas des fibres de carbone, la rigidité des fibres entraîne une quantité plus importante de filaments rompus dans le tricot 2.1.2.1. La présence de ces fibres rompues limite la capacité des filaments de se déplacer les uns par rapport aux autres, ce qui entraîne également un blocage des mailles plus rapide.

2.3.2.4 Conclusion sur la déformation structurale des tricots

La déformabilité structurale des tricots a été étudiée en fonction de la contexture, de la direction de sollicitation ainsi que de la nature de fibre. Dans tous les cas, la déformabilité est liée à la configuration initiale de la maille et aux caractéristiques de la mèche. Les dimensions de la maille, la longueur de fil par maille, la section des mèches et le diamètre des filaments sont les paramètres qui interviennent de manière significative dans ce comportement. Le tableau 2.5 récapitule l'impact de l'augmentation des paramètres influents sur la déformabilité

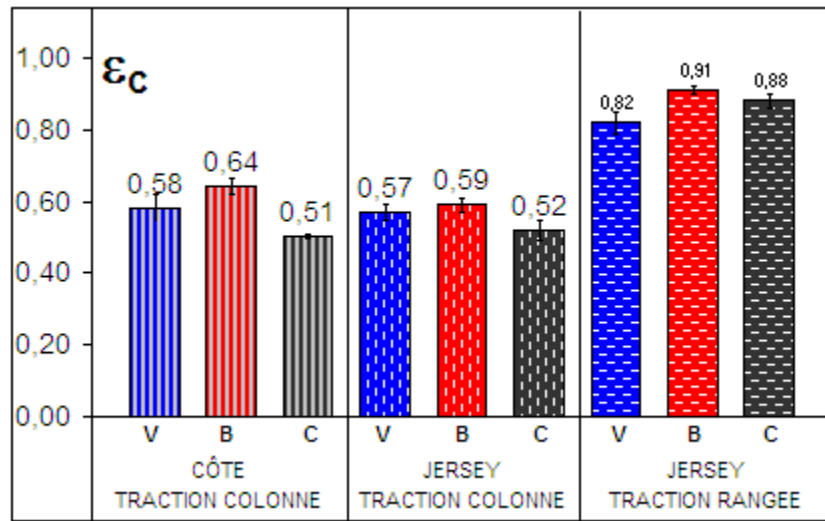


Figure 2.28 – Histogramme de la déformation critique au blocage des mailles des tricots secs simples en fonction de la nature de fibre

	$L_f \nearrow$	$h \nearrow$	$b \nearrow$	$d_m \nearrow$	$d_f \nearrow$
ϵ_c colonne	\nearrow	\searrow	\nearrow	\searrow	\nearrow et \searrow
ϵ_c rangée	\nearrow	\nearrow	\searrow	\searrow	\nearrow et \searrow

Tableau 2.5 – Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres géométriques de la maille sur la déformabilité du tricot

des tricots. La nature de la fibre intervient de manière négligeable dans ce comportement. Les contexture côte sont plus déformables, du fait de leur architecture tridimensionnelle qui nécessite une longueur de fil par maille plus importante pour passer d'une maille avant à une maille arrière. Le comportement des tricots à mailles cueillies est anisotrope avec une déformabilité plus importante dans la direction rangée liée au procédé d'élaboration des tricots par entrelacement des mailles dans la direction colonne.

2.3.3 Reprise d'effort par les fibres

Dans cette section, l'étude se concentre sur la deuxième partie de la courbe qui correspond au comportement du tricot après blocage total des mailles, au moment où les efforts sont totalement transmis aux fibres. Le comportement n'est alors plus lié à la déformation structurale du textile mais à une déformation physique des fibres. Cette phase se traduit par une déformation élastique précédant un endommagement successif des fibres conduisant à la rupture du tricot. La caractérisation mécanique de cette phase se fait par la mesure de la rigidité du textile pendant la phase élastique et la valeur de l'effort à la rupture. L'influence de la contexture, de la direction de sollicitation et de la nature de la fibre sur ce comportement sont étudiées.

Les histogrammes des figures 2.29 et 2.30 présentent les rigidités et résistances à la rupture des tricots en fonction de la contexture, la direction de sollicitation et la nature des fibres. Les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des essais de même type sont données.

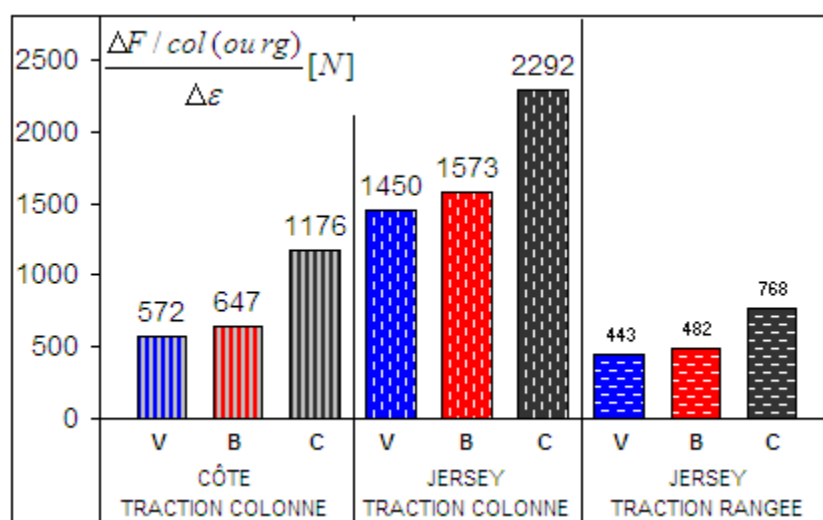


Figure 2.29 – Histogramme de la rigidité des tricots secs simples après le blocage des mailles en fonction de la nature de fibre

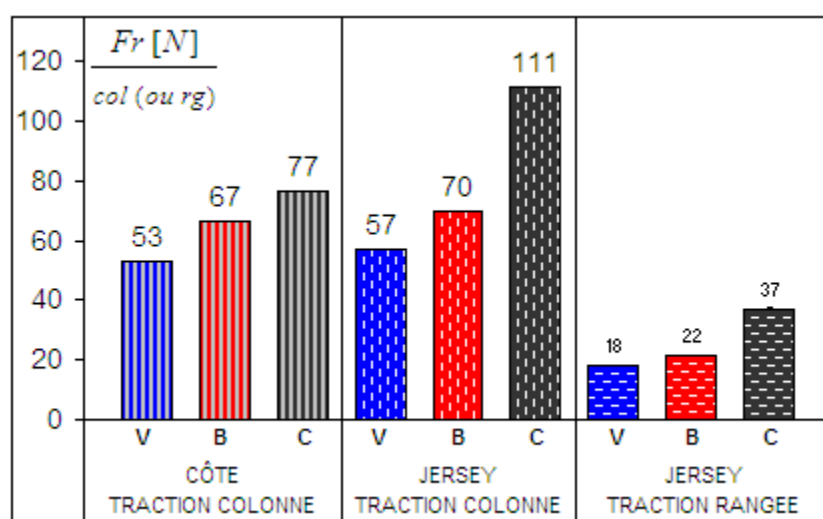


Figure 2.30 – Histogramme de la résistance à la rupture des tricots secs simples après le blocage des mailles en fonction de la nature de fibre

2.3.3.1 Influence de la contexture

Les tricots côte n'ayant pas dépassé le blocage des mailles en traction rangée, la discussion se fait sur les essais sollicités dans la direction colonne des tricots. Quelle que soit la nature de la fibre, les tricots jersey présentent une rigidité plus importante et une résistance à la rupture plus élevée que les tricots côte lorsque l'effort est ramené à une colonne de mailles. L'architecture tridimensionnelle des tricots de contexture côte ajoutée au fait que sa densité de mailles est deux fois plus élevée implique que la mèche présente une forme plus courbée dans la maille des tricots côte que dans celle des tricots jersey après blocage des mailles. La

proportion de fibres travaillant dans la direction de sollicitation ou dans la direction proche de la direction de sollicitation est donc plus faible pour les tricots de contexture côte, ce qui affaiblit la rigidité et la résistance sur une colonne. Lorsque l'effort est donné par unité de largeur de tricot, la tendance s'inverse et les tricots de contexture côte présentent de meilleures performances. La densité de mailles dans le tricot étant deux fois plus élevée, le nombre de colonnes et donc de mèches sollicitées dans la largeur l'est également.

2.3.3.2 Influence de la direction de sollicitation

Les tricots côte n'ayant pas dépassé le blocage des mailles dans la direction rangée, l'influence de la direction de sollicitation est étudié pour les tricots jersey. Les résultats présentés dans les figures 2.29 et 2.30 montrent que la direction de sollicitation influe de manière importante sur les propriétés mécaniques des tricots secs après blocage des mailles. Les rigidités et les résistances sont plus élevées dans la direction colonne du tricot pour toutes les natures de fibres. L'observation de la forme de la maille bloquée permet d'expliquer ce phénomène (Figure 2.31). En traction colonne, la maille bloquée est allongée et les jambes des mailles sont tendues et orientées dans une direction proche de celle de la sollicitation. Sur une colonne de mailles, ce sont les deux jambes qui encaissent les efforts et donc deux mèches de fibres supportent les efforts. Dans le cas de la traction rangée, lorsque le textile atteint sa déformation macroscopique maximale, la maille perd sa forme et la mèche prend une forme ondulée. Sur une rangée de mailles, seulement une mèche supporte les efforts.

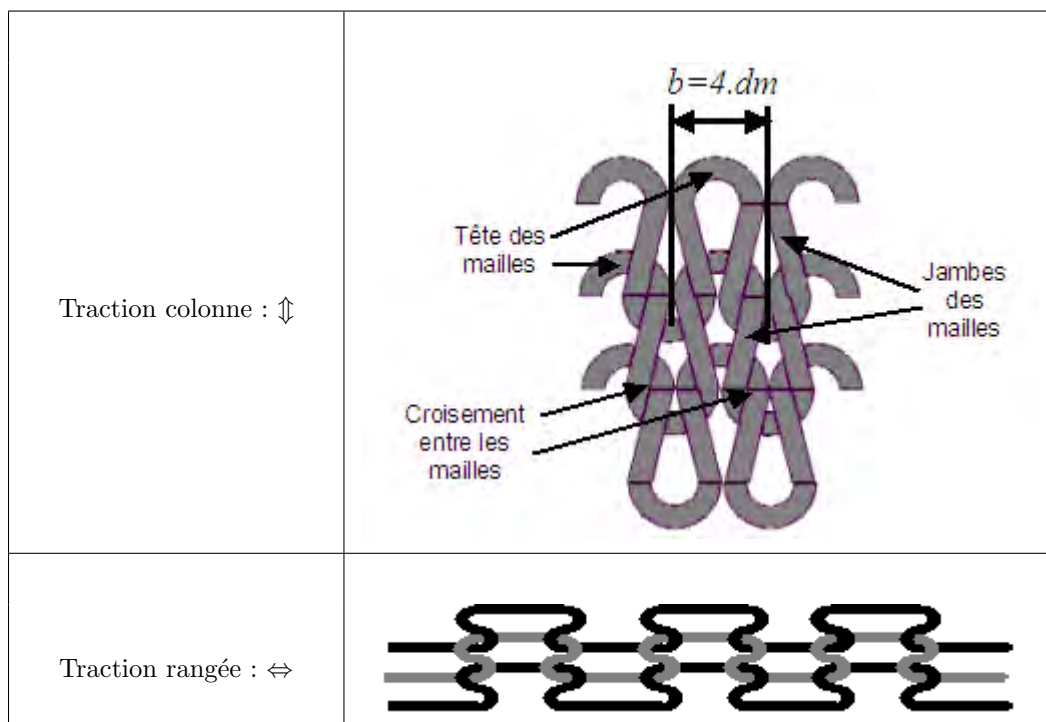


Figure 2.31 – Schématisation des tricots jersey au blocage des mailles en traction colonne et traction rangée

2.3.3.3 Influence de la nature de fibre

Quelles que soient la contexture ou la direction de sollicitation, les tricots en fibres de carbone présentent les meilleures propriétés mécaniques avec une résistance et une rigidité supérieures aux tricots en fibres de verre et de basalte. Les tricots en fibres de basalte présentent des propriétés légèrement supérieures à celles des tricots en fibres de verre. Après le blocage définitif des mailles, des zones de la maille peuvent être tendues et orientées dans une direction proche de la direction de sollicitation. Dans le cas de la direction colonne, les jambes des mailles sont tendues et orientées dans une direction proche de la direction de sollicitation tandis que la tête et les pieds de la maille sont très courbées. Dans le cas de la traction dans la direction rangée, ce sont la tête et les pieds des mailles qui sont tendus et orientés dans une direction proche de la sollicitation, tandis que les jambes des mailles sont courbées. La rigidité en traction des mèches fibreuses intervient donc dans les propriétés mécaniques des tricots. La rigidité des mèches en traction a précédemment été évaluée théoriquement. La rigidité des mèches a également été caractérisée expérimentalement, en réalisant des essais de traction sur des mèches de fibres en s'inspirant de la norme NF ISO 3341 (Verre textile - Fils : Détermination de la force de rupture et de l'allongement à la rupture en traction). Les valeurs des rigidités obtenues théoriquement et expérimentalement sont données dans le tableau 2.6

	Verre	Basalte	Carbone
Valeurs théoriques	19,3 $N.mm^2$	18,6 $N.mm^2$	54,9 $N.mm^2$
Valeurs expérimentales	15,2 $N.mm^2$	15,2 $N.mm^2$	36,0 $N.mm^2$

Tableau 2.6 – Raideur équivalente $\frac{\Delta F}{\Delta \epsilon}$ en traction des mèches de fibres de verre, de basalte et de carbone

La mèche de fibres de carbone a une rigidité plus importante que les deux autres, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus. Les mèches de fibres de verre et de basalte ont une rigidité équivalente. Les rigidités des tricots en fibres de verre et de basalte sont effectivement proches, cependant celle des tricots en fibres de basalte est supérieure. La nature de la fibre a un impact important sur le comportement du tricot sec après blocage des mailles, cependant, il ne constitue pas le seul paramètre à prendre en compte. Dans l'étude du comportement structural du tricot (section 2.3.2.3), il a été mis en évidence que la nature de la fibre intervenait essentiellement dans le comportement du tricot par la caractéristiques de leur filaments et de leur capacité à se déplacer les uns par rapport aux autres dans la mèche. La section plus épaisse des fibres de verre limite ces déplacement et donc la modification de la section de la mèche par compression locale ce qui entraîne un blocage des mailles plus rapide. Le blocage des mailles plus rapide, implique donc que la maille présente des mèches plus courbées au niveau de la tête et du croisement des mailles adjacentes et d'autre part que l'allongement de la maille dans la direction de sollicitation a été limitée. L'angle entre l'orientation des jambes de la maille et la direction de sollicitation est plus grand. Par conséquent le tricot perd en rigidité et en résistance.

2.3.4 Conclusion intermédiaire

Cette section a permis de décomposer le comportement d'un tricot sec lorsqu'il est sollicité en traction uniaxiale et d'étudier les paramètres qui entrent en jeu dans ce comportement. Le comportement du tricot sec est complexe. Il se déroule en plusieurs étapes successives qui font intervenir différents paramètres. Dans un premier temps, la déformabilité du tricot sec

est essentiellement due à une modification de la configuration de la maille qui se déforme fortement par flexion de la mèche sous de faibles efforts. La configuration de la maille à l'état initial détermine la déformabilité du tricot sec. Les paramètres liés à la géométrie de la maille sont ses dimensions (h et b), la longueur de fil par maille (L_f) et la section de la mèche (S_m). La nature de la fibre intervient de manière moins importante sur le comportement structural du tricot sec. Après blocage des mailles, l'effort est redistribué dans les fibres et augmente rapidement avec une faible déformation. La configuration de la maille à l'état bloqué ainsi que la nature de la fibre entrent en jeu dans cette étape.

Cette étude a permis de mettre en évidence le fait que les tricots secs simples sont plus déformables en rangée qu'en colonne et de manière plus significative pour la contexture côte. D'autre part les contextures jersey sont moins déformables que les contextures côte dans les deux directions de sollicitation. Après blocage des mailles la contexture jersey présente de meilleures propriétés mécaniques lorsque l'effort est rapporté à une colonne ou rangée de mailles. Les meilleures performances sont obtenues dans la direction colonne de la contexture jersey en fibres de carbone.

Un essai de traction a été réalisé sur un tissu satin en fibres de verre E. La figure 2.32 présente les courbes d'effort déformation du tissu satin et du tricot jersey en traction colonne et rangée.

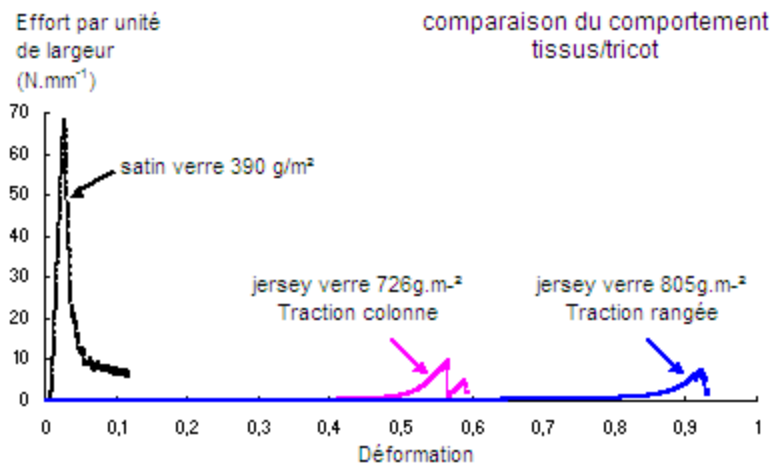


Figure 2.32 — Courbe d'effort-déformation d'un tricot jersey en traction colonne et rangée et d'un tissu satin en fibres de verre

Les résultats obtenus mettent en évidence l'importante différence de comportement entre un tissu et un tricot. De par leur structure, les tricots jersey présentent une déformabilité structurale bien plus importante que les tissus dont les fibres sont alignées et les performances mécaniques des tricots sont très inférieures aux tissus satin.

Dans la suite du chapitre, une modification des contextures est proposée pour optimiser les performances mécaniques des textiles tricotés, l'objectif étant d'approcher les performances obtenues avec un tissu.

2.4 Optimisation de la contexture jersey

Dans cette section, une modification des contextures est proposée dans l'objectif d'améliorer les performances des tricots secs. Suite aux résultats obtenus dans la section précédente, le jersey a été choisi pour constituer la base des nouvelles contextures. D'une part, le jersey présente des propriétés plus intéressantes que la côte, d'autre part, le jersey a une structure moins dense pour laquelle il est plus facile d'insérer de nouveaux éléments. Enfin, les textures simple fontures présentent des qualités intéressantes pour la mise en œuvre de préformes de formes complexes et notamment des pièces de révolution de forme cylindrique.

2.4.1 Contextures tricotées

Les tricots jersey sont très anisotropes, ils sont plus déformables et moins performants mécaniquement dans la direction rangée (sections 2.3.2.2 et 2.3.3.2). L'amélioration des propriétés mécaniques dans la direction rangée est recherchée par l'insertion de fils flottés dans la largeur du tricot (cf. section 2.4.1.1). L'objectif est d'étudier l'influence de la présence et du nombre de fils flottés insérés dans la rangée du jersey et d'évaluer l'impact de la nature de la fibre sur cette influence.

2.4.1.1 Description des contextures

Trois contextures avec un, deux et trois fils flottés par rangée sont étudiées :

- jersey - flotté - 3 - charge : *JC1*
- jersey - flotté - 3,3 - charge : *JC2*
- jersey - flotté - 3,3,3 - charge : *JC3*

La définition du flotté est donnée à la section 1.2.2.2 de la page 15. Les tricots étudiés sont donc à base jersey et le flotté est rattaché au tricot par une charge (Figure 1.12.a). Le chiffre « 3 » correspond au nombre de mailles consécutives sur lesquelles le fil est flotté avant d'être rattaché au tricot par une charge et le nombre de chiffres « 3 » indique le nombre de mèches flottées insérées par rangée. Les noms des contextures sont abrégées en *JC1*, *JC2* et *JC3* qui correspondent respectivement aux jersey avec 1, 2 et 3 mèches flottées par rangée. L'abréviation *JC* est utilisée pour faire référence aux contextures *Jersey-Flotté-Chargé* en général sans mentionner le nombre de flottés insérés. Pour une meilleure compréhension de l'architecture des contextures, les diagrammes techniques des tricots sont donnés dans la figure 2.33 et les photos des faces avant et arrière de chacune des contextures sont présentées à la figure 2.34. Les diagrammes techniques ont été préalablement décrits à la section 1.2.2.2.

Les mèches flottées ne sont pas complètement tendues dans le tricot. Elles viennent combler les zones dépourvues de fibres des tricots jersey laissant moins d'espaces vides. En augmentant la quantité de fils flottés par rangée, la quantité de fibres endommagées pendant le tricotage augmente.

2.4.1.2 Caractéristiques des éprouvettes

Les éprouvettes ont été réalisées sur le même métier utilisé pour élaborer les éprouvettes de contextures simples. Les mêmes paramètres de tricotage ont été choisis pour obtenir des géométries de mailles proches des contextures jersey. Les tableaux 2.7 et 2.8 donnent les caractéristiques des différents tricots. Les mèches flottées n'étant pas tendues dans le tricot, le pourcentage de longueur de flotté par rapport à la longueur d'une rangée (largeur de

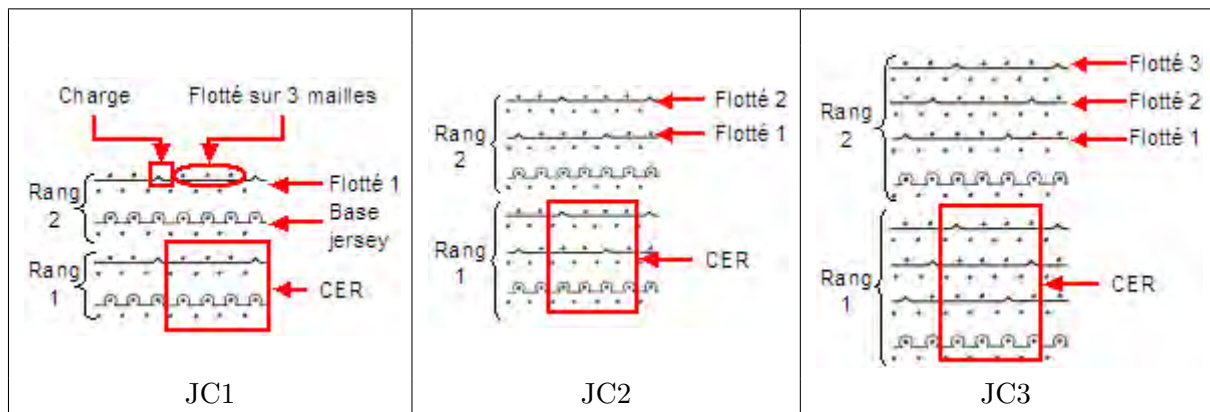


Figure 2.33 – Diagrammes techniques des contextures jersey chargées

l'éprouvette pour la traction colonne et hauteur de l'éprouvette pour la traction rangée) est calculé par la formule suivante :

$$\% L_{flot} = \frac{L_{flot}}{\text{Longueur rangée}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Les dimensions des mailles peuvent varier entre les différentes contextures et selon la nature de la fibre du fait du retour élastique après tricotage lié à la nature de la fibre d'une part et aux dimensions et à l'architecture du textile d'autre part. L'ajout de mèches flottées augmente l'épaisseur des tricots.

	TRACTION COLONNE								
	JC1			JC2			JC3		
	VER	BAS	CAR	VER	BAS	CAR	VER	BAS	CAR
Hauteur de maille h (mm)	2,95	2,85	2,95	2,70	2,80	2,90	2,80	2,80	2,80
Largeur de maille b (mm)	4,75	4,75	4,75	4,15	3,95	4,15	4,80	4,80	4,80
Longueur de fil par maille L_f (mm)	14,40	15,00	14,90	13,40	12,80	12,40	16,40	15,40	15,80
Longueur de fil flotté par rangée L_{flot} (mm)	130	120	130	130	130	130	130	130	130
$\% L_{flot}$ (eq.2.4)	130	130	130	130	137	130	118	118	118
Épaisseur du tricot e (mm)	1,85	1,80	1,75	2,20	2,20	2,10	3,65	3,65	3,30
Densité surfacique ($g.m^{-2}$)	927	931	603	1285	1281	761	1500	1457	984

Tableau 2.7 – Caractéristiques des éprouvettes de traction colonne de contextures JC1, JC2 et JC3

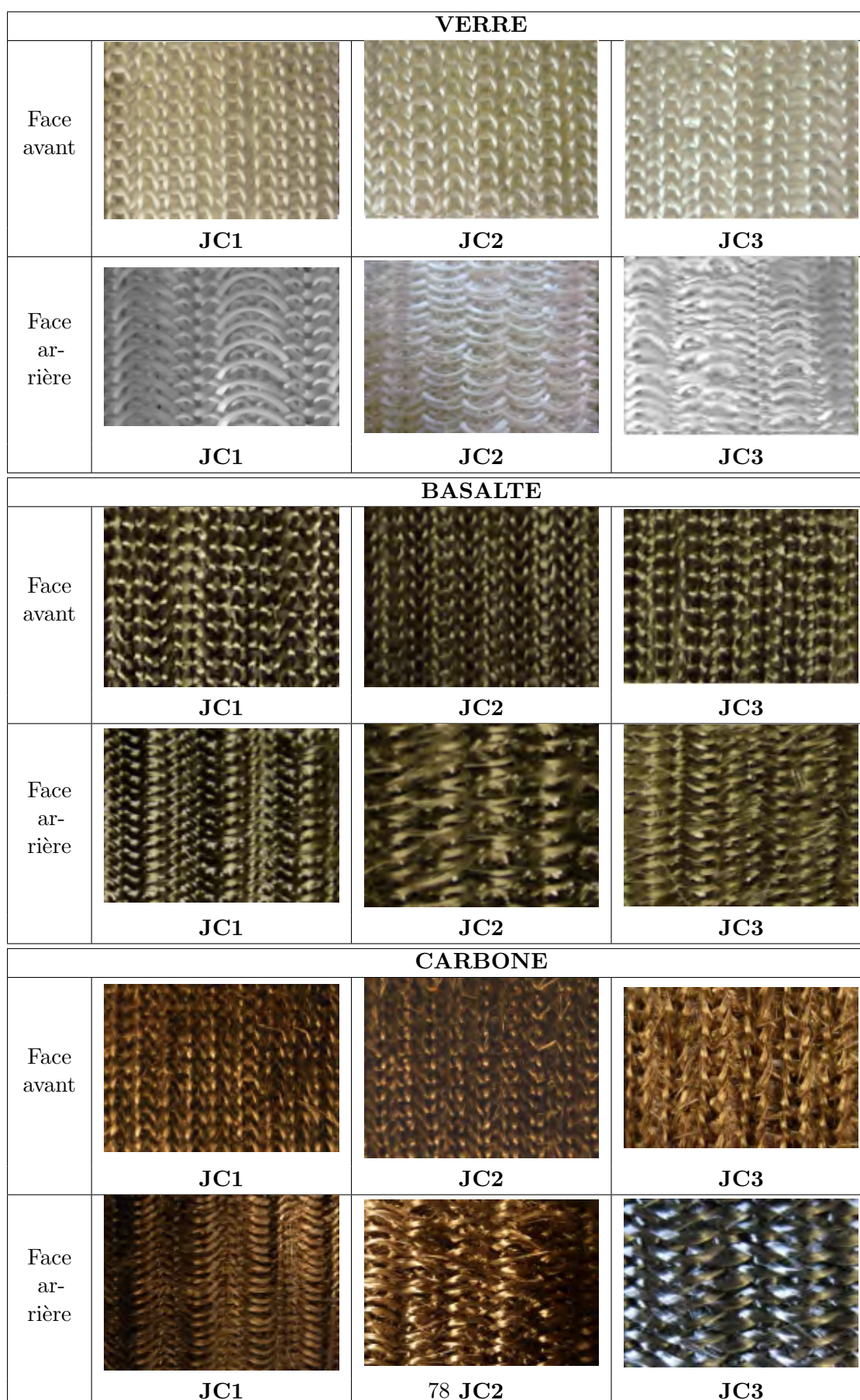


Figure 2.34 – Photos des contextures jersey chargé dans les trois natures de fibres

	TRACTION RANGÉE								
	JC1			JC2			JC3		
	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone
Hauteur de maille h (mm)	2,85	2,85	3,00	2,85	2,85	2,85	2,70	2,70	2,80
Largeur de maille b (mm)	4,85	4,75	5,00	4,50	4,40	4,50	4,85	4,70	4,60
Longueur de fil par maille L_f (mm)	15,30	14,60	15,50	15,90	14,20	14,80	14,60	13,20	15,70
Longueur de fil flotté par rangée L_{flot} (mm)	355	355	355	350	345	355	370	375	360
% L_{flot} (eq.2.4)	122	120	118	130	128	127	123	129	126
Épaisseur du tricot e (mm)	1,95	1,80	1,80	2,10	2,16	2,05	2,20	2,30	2,20
Densité surfacique ($g.m^{-2}$)	921	896	570	1287	1211	813	1493	1487	1038

Tableau 2.8 – Caractéristiques des éprouvettes de traction rangée de contextures JC1, JC2, JC3

2.4.2 Comportement en traction des tricots jersey chargés

Des essais de traction uniaxiale dans la direction colonne et rangée ont été opérés sur les tricots secs. La procédure d'essai suivie est identique à celle utilisée pour les tricots secs simples et exposée à la section 2.2. L'ensemble des courbes est donné dans l'annexe C. Une courbe représentative de chaque essai a été choisie pour la discussion. La figure 2.35 présente les courbes d'effort-déformation du jersey, du JC1, du JC2 et du JC3 pour chaque nature de fibre et chaque direction de sollicitation.

L'observation des courbes de comportement montrent que les fils flottés ont une influence importante sur le comportement des tricots secs. Les courbes ont une allure similaire à celle des tricots jersey avec deux étapes distinctes. La première étape de déformation macroscopique de la structure du tricot et la seconde étape de reprise des efforts par les fibres jusqu'à rupture. Dans le cas des essais de traction colonne, le comportement des tricots JC est similaire à celui des tricots jersey. Dans le cas des essais de traction rangée, les contextures JC2 et JC3 ont dépassé les capacités en charge des mors pneumatiques et n'ont donc pas été testées jusqu'à rupture. Sur les courbes de traction rangée réalisée sur les contextures JC1, une troisième étape avec une reprise des efforts est observée après la rupture. La figure 2.36 présente une courbe de traction rangée caractéristique des contextures JC1.

Dans la première phase, le tricot se déforme sous de faibles charges. Il s'agit d'une déformation macroscopique de la structure du tricot. La configuration des mailles se modifie comme dans le cas des tricots jersey simples et les fils flottés se tendent dans la direction de sollicitation. Le tricot atteint son état de déformation structurale maximale lorsque les mèches flottées sont tendues dans la direction de sollicitation. Les mailles du jersey n'atteignent pas le blocage. Dans la deuxième phase, les efforts sont transmis aux fibres, seules les mèches de flottés tendues reprennent les efforts jusqu'à leurs ruptures. Après la rupture des fils flottés, les efforts sont retransmis aux mailles jersey et le comportement correspond à un tricot jersey sollicité dans la direction rangée.

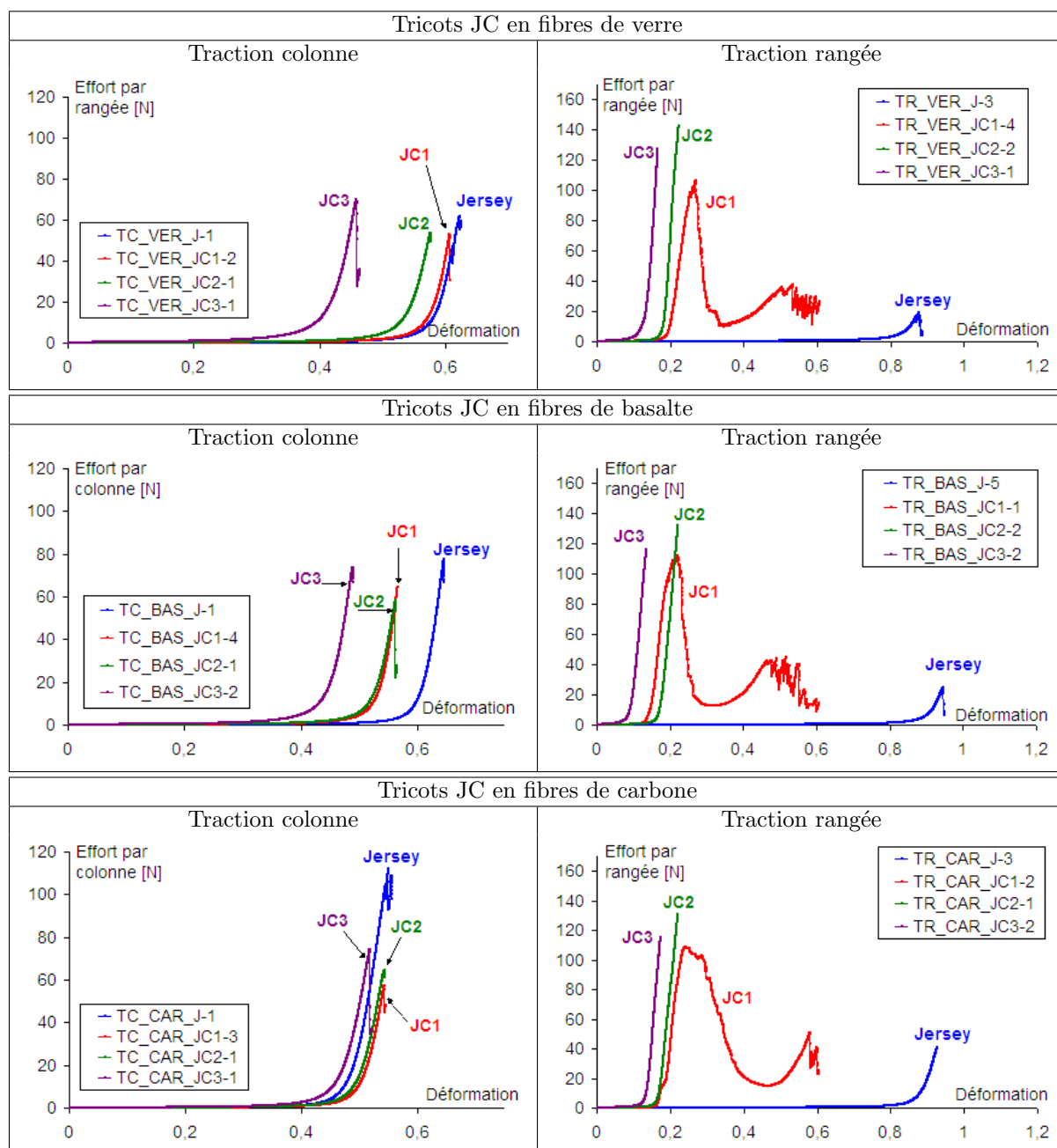


Figure 2.35 – Courbes d'effort-déformation sur les tricots JC dans les trois natures de fibres

2.4.2.1 Influence des fils flottés sur la déformabilité structurale de la maille

L'observation des courbes d'effort-déformation de la figure 2.35 montre que l'insertion de fils flottés a une influence sur les niveaux de déformation atteints par les tricots. Les histogrammes de la figure 2.37 donnent les valeurs des déformations critiques en traction colonne et rangée des différentes contextures dans les trois natures de fibres. Les directions de sollicitation sont étudiées séparément.

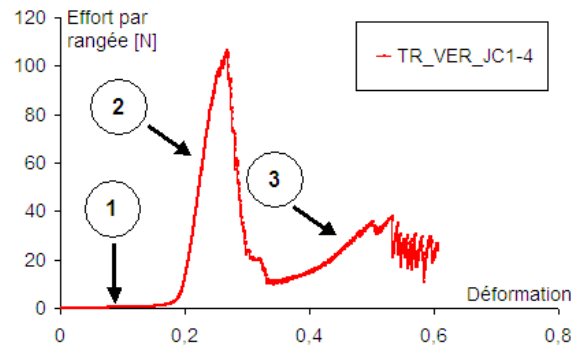


Figure 2.36 – Courbes d'effort-déformation d'un tricot JC1 sollicité dans la direction rangée

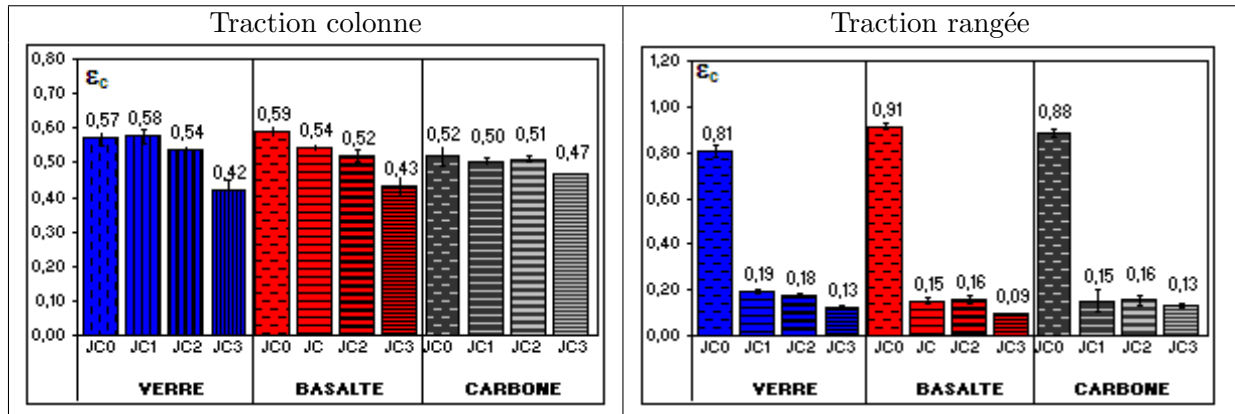


Figure 2.37 – Histogramme donnant les déformations critiques des tricot jersey et JC en fonction de la direction de sollicitation, de la nature de fibre et de la contexture

Dans le cas d'une sollicitation dans la direction colonne du tricot, les fils flottés ont une influence plus ou moins négligeable sur la déformabilité des tricot selon les natures de fibre. Dans tous les cas, les niveaux de déformation atteints avec les contextures chargées sont soit plus faibles, soit équivalents à ceux atteint avec les contextures jersey simples. Un agrandissement de la zone de déformation structurale des courbes d'effort-déformation en traction colonne (Figure 2.38) montre que l'augmentation de la quantité de fils flottés par rangée a pour conséquence une augmentation des efforts due à des frottements plus importants dans le tricot et une diminution de la partie linéaire de la courbe due au fait que la présence des charges bride le tricot et que de ce fait, la zone de transition de blocage des mailles débute plus rapidement. Les figures 2.39.a et 2.39.b présentent des schémas de la configuration d'un jersey chargé au repos et sollicité en traction colonne. Le comportement structural d'un jersey et d'un jersey chargé est identique et correspond à un changement de configuration de la maille qui s'allonge dans la direction colonne. En observant les photos des contextures jersey et JC (Figures 2.4 et 2.34), les mèches flottées remplissent les zones dépourvues de fibres des tricot jersey ce qui engendre d'une part une augmentation des efforts de frottement dans le tricot et un blocage des mailles atteint plus rapidement. Ces caractéristiques sont particulièrement vraies pour les tricot en fibres de verre et de basalte. Dans le cas des tricot

en fibres de carbone, l'augmentation du nombre de flottés engendre effectivement des efforts de frottement plus importants, mais l'impact des fils flottés sur la déformabilité du tricot n'est pas significatif. L'effet de la présence des mèches flottées semble être « gommé » par le frottement des fibres rompues.

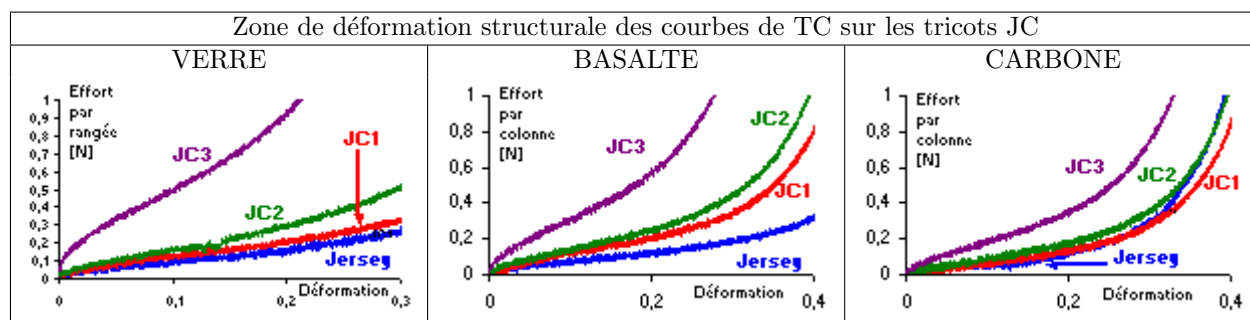


Figure 2.38 – Agrandissement de la zone de déformation structurale courbes de traction colonne des tricots JC

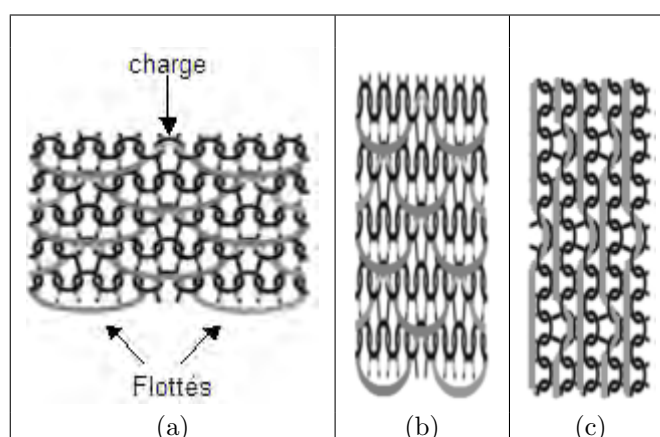


Figure 2.39 – Schéma d'un jersey chargé (a) au repos, (b) en traction colonne, (c) en traction rangée

En traction rangée, les fils flottés ont une importante influence sur la déformabilité des tricots (Figures 2.35 et 2.37). Comme mentionné précédemment, le tricot atteint son état de déformation structurale maximale lorsque les mèches flottées sont tendues de manière quasiment linéaire dans la direction de sollicitation. Le blocage des mailles de la base jersey de la texture n'est pas atteint. La figure 2.39.c présente le schéma d'un jersey chargé lorsqu'il est sollicité en traction rangée. L'agrandissement de la zone de déformation structurale du tricot des courbes de traction rangée (Figure 2.40) montre que l'augmentation de la quantité de fils flottés par rangée engendre une augmentation des efforts de frottement dans le tricot. Les niveaux de déformation atteints, dépendent d'une part du pourcentage de longueur de flotté par rapport à la longueur d'une rangée ($\% L_{flot}$) donné dans le tableau 2.8 et d'autre part du nombre de flottés insérés par rangée. Son augmentation diminue la déformabilité du tricot puisqu'ils limitent la capacité des mèches à s'aligner. La nature de la fibre n'intervient

pas dans cette phase de comportement.

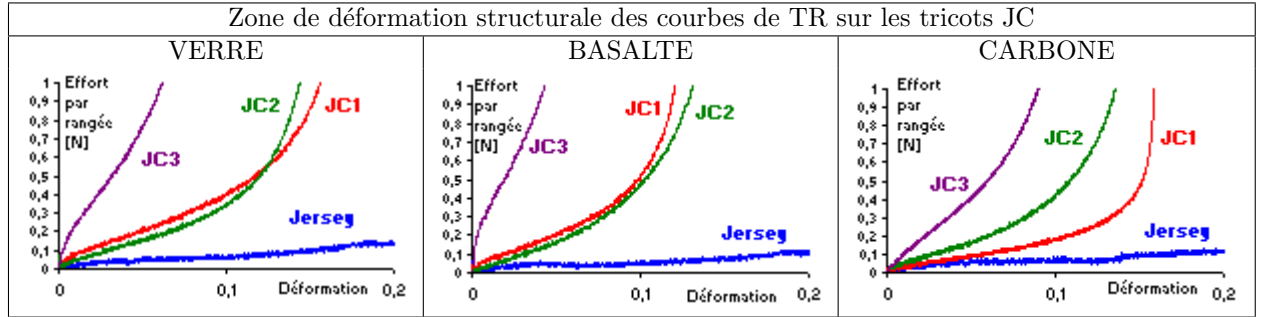


Figure 2.40 – Agrandissement de la zone de déformation structurale courbes de traction rangée des tricots JC

2.4.2.2 Influence sur la tenue mécanique

Les courbes d'effort-déformation de la figure 2.35 montrent que l'insertion de mèches flottées dans la rangée du tricot améliore de manière significative la tenue mécanique des tricots dans la direction rangée et semble avoir une influence légère dans la direction colonne. Les histogrammes de la figure 2.41 donnent les valeurs des rigidité et des résistances des tricots.

En traction colonne, la même tendance est observée pour les tricots en fibres de verre et de basalte. Les contextures JC1 sont les plus rigides tandis que les contextures JC3 sont les plus résistantes. Dans le cas des tricots en fibres de carbone, ce sont les contextures jersey qui présentent les meilleures propriétés mécaniques. Dans la section 2.3.3.3, il a été mis en évidence le fait que la tenue mécanique du tricot sec est liée à la configuration géométrique de la maille bloquée et à la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation.

Dans le cas d'une traction dans la direction colonne, l'insertion de mèches flottées dans la rangée du tricot a peu d'influence sur la tenue mécanique. Après le blocage des mailles, les mèches flottées ne sont pas sollicitées et ce sont les mailles de la base jersey de la contexture qui reprennent les efforts. Les mailles des JC ont une géométrie proche de la maille du jersey simple après blocage. La géométrie de la maille est liée aux caractéristiques géométriques du tricot à l'état initial. La déformabilité structurale du tricot est liée à la géométrie de la maille. Quelles que soient les dimensions de la maille, plus la longueur de fil est importante, plus la maille est déformable. Dans le cas de la traction colonne, plus le rapport de la largeur de maille sur la hauteur de maille (b/h) est important plus la maille est déformable. Dans le cas de la traction rangée, plus le rapport de la hauteur de maille sur la largeur de maille (h/b) est important, plus la maille est déformable. De ce fait, la capacité d'une maille à se déformer a été définie par les relations suivantes :

- Dans le cas de la traction colonne :

$$\frac{bL_f}{h} \quad (2.5)$$

- Dans le cas de la traction rangée :

$$\frac{hL_f}{b} \quad (2.6)$$

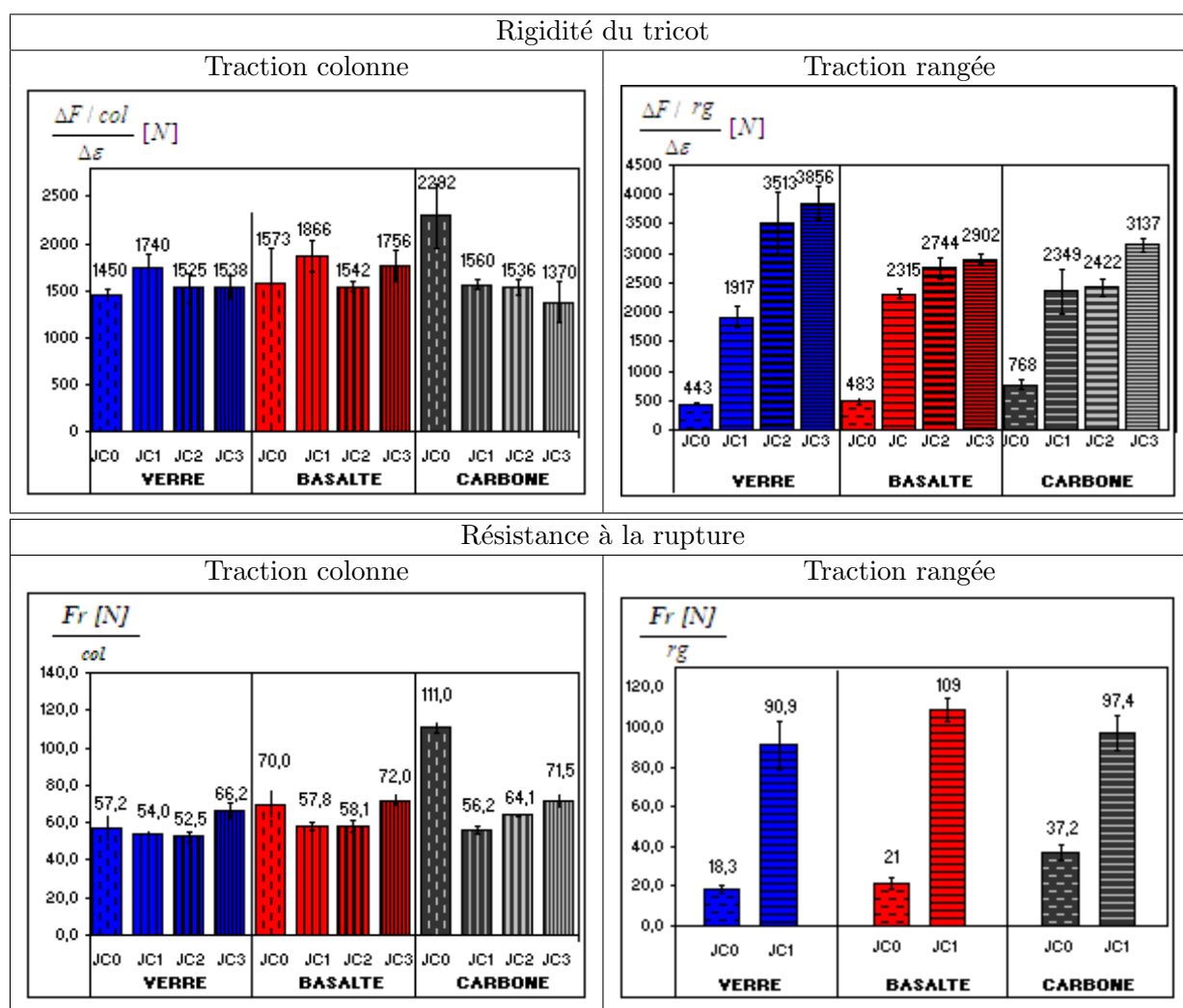


Figure 2.41 — Histogrammes des rigidités et des résistances des tricots de contextures jersey et JC de différentes natures de fibre

Les valeurs de la capacité de la maille à se déformer sont données dans la figure 2.42.a. Plus la maille est déformable, plus la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation sera importante après blocage des mailles. Cependant, ce calcul ne prend pas en compte la présence des fils flottés qui diminuent la déformabilité de la maille. L'orientation des fibres après blocage des mailles dépend de la capacité de la maille à se déformer, mais également de la hauteur initiale de la maille (ou la densité de mailles par unité de hauteur du tricot). En effet, plus la hauteur de la maille est importante (et la quantité de mailles par hauteur sera faible), plus la longueur des jambes des maille est grande et donc plus la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation est élevée. L'histogramme de la figure 2.42.b donne les hauteurs initiales des mailles. Les mailles de JC1 sont initialement plus grande que celles des autres ce qui explique leur rigidité plus élevée.

Concernant la résistance à la rupture, les contextures JC3 présentent la charge à la rupture la plus élevée. Dans les tricots jersey, la rupture a lieu par cisaillement au niveau des

croisements entre les mailles adjacentes. La présence de ces charges engendre des surfaces de contact entre les mèches plus importantes, permettant une meilleure distribution des contraintes dans les zones de croisement entraînant une charge à la rupture plus élevée. Dans la contexture *JC3*, sur une rangée, 3 mailles sur 4 sont chargées.

Concernant les tricots en fibres de carbone, bien que les différentes contextures présentent des déformabilités structurales proches et que les hauteurs de mailles initiales des contextures *JC3* et *JC2* soient plus importantes, ce sont les tricots jersey qui présentent les meilleures propriétés en rigidité et en résistance. Les éprouvettes en fibres de carbone présentent la plus grande quantité de fibres rompues lors du tricotage. Plus les contextures sont denses, plus la quantité de fibres endommagées augmente ce qui explique la diminution des propriétés avec l'insertion de fils flottés.

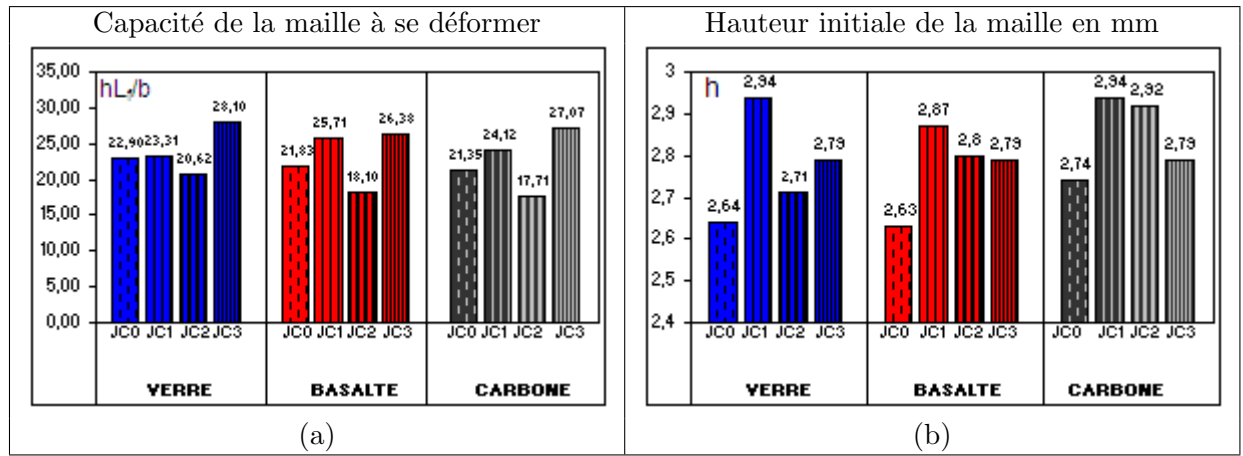


Figure 2.42 – (a) Capacité de la maille à se déformer en traction colonne en fonction de ses paramètres géométriques et (b) hauteur initiale de la maille des éprouvettes de JC en traction colonne

En traction rangée, la présence des flottés augmente considérablement les propriétés du tricot pour toutes les natures de fibre. Le tricot, dans sa configuration bloquée présente les mèches flottées tendues tandis que les mailles de la base jersey de la contexture n'atteignent pas le blocage. Contrairement à la traction colonne, ce sont les fils flottés qui sont sollicités et reprennent les efforts. Les fibres des flottés sont alors presque entièrement orientées dans la direction de sollicitation (Figure 2.39.c). La présence des mèches flottées entraîne alors une importante augmentation des propriétés mécaniques du tricot.

La rigidité augmente avec le nombre de flottés mais de manière plus ou moins importante selon la nature de la fibre. Les valeurs des rigidités obtenues avec les différentes contextures sont comparées à la rigidité du tricot jersey. Un Facteur d'Augmentation de la Rigidité (*FAR*) est défini comme étant le rapport entre la rigidité d'un *JC* et celle du jersey (eq. 2.7). Dans le tableau 2.9 sont données les valeurs des rigidités de chaque tricot et leur facteur d'augmentation de rigidités.

$$FAR(JCi) = \frac{\text{Rigidité } JCi}{\text{Rigidité Jersey}} \quad (2.7)$$

La plus grande augmentation de rigidité est obtenue avec les tricots en fibres de verre qui atteignent des valeurs dépassant celles des tricots en fibres de basalte et de carbone.

		Jersey	JC1	JC2	JC3
Verre	Rigidité FAR	443 -	1917 4,3	3513 7,9	3856 8,7
Basalte	Rigidité FAR	483 -	2315 4,8	2744 5,7	2902 6,0
Carbone	Rigidité FAR	768 -	2349 3,1	2422 3,2	3137 4,1

Tableau 2.9 – Valeurs des rigidités et des FAR en traction rangée de l'ensemble des tricots jersey et JC

En ce qui concerne les contextures *Jersey* et *JC1*, les plus grandes rigidités sont obtenues avec les fibres de carbone dont la mèche est également la plus rigide en traction (Tableau 2.6), cependant, quelle que soit la contexture, le FAR des tricots en fibres de carbone est le plus faible. Concernant les contextures *JC2* et *JC3*, ce sont les tricots en fibres de verre qui présentent les meilleures rigidités malgré une mèche moins rigide en traction. Une perte de rigidité peut-être liée à l'endommagement des tricots pendant le tricotage. Plus les filaments sont raides plus les fibres s'endommagent pendant le tricotage. Les caractéristiques des fibres sont données dans le tableau 2.1. Les tricots en fibres de carbone dont les filaments sont raides, sont très abîmés par le tricotage. En augmentant le nombre de flottés dans le tricot, la quantité de fibres abîmées augmente d'autant. Les tricots en fibres de verre, dont les filaments sont moins rigides, sont très peu abîmés par le tricotage et présentent une faible quantité de fibres rompues quelle que soit la contexture.

Concernant la résistance à la rupture, l'influence du nombre de flotté n'est pas connue puisque seuls les *JC1* ont atteint la rupture. La charge à la rupture des tricots en fibres de verre et de basalte a été multipliée par 5 avec la présence des mèches flottées tandis que celle des tricots en fibres de carbone, seulement par 2,5, ce qui s'explique une nouvelle fois par la présence des fibres de carbone rompues en plus grande quantité dans les tricots.

2.4.3 Conclusion sur l'influence de fils flottés sur le comportement des tricots secs

L'insertion de fils flottés dans la largeur des tricots a une faible influence sur le comportement des tricots secs en traction colonne. Dans cette direction, les flottés ne sont pas directement sollicités et le tricot se comporte comme un tricot jersey. Une faible modification des valeurs des propriétés a été observée. La présence des flottés modifie sensiblement la configuration de la maille à l'état initial et au blocage des mailles et donc l'orientation des fibres dans le tricot. L'impact des fils flottés sur les propriétés du tricot sec est différent selon la nature de la fibre. La nature de fibre intervient essentiellement à travers le diamètre des filaments qui constituent la mèche.

En traction rangée, ce sont les fils flottés qui pilotent le comportement du tricot et la base jersey constitue essentiellement le support. De ce fait, la déformabilité structurale du tricot est réduite à la déformation nécessaire à la mise sous tension des mèches flottées. L'orientation proche de la direction de sollicitation des mèches une fois tendues a pour conséquence une importante augmentation de la tenue mécanique du tricot. L'impact de la présence de fils flottés et de leur quantité sur les propriétés du tricot sec dépend également de la nature de la fibre à travers le diamètre des filaments.

Les tricots en fibres de carbone de contexture jersey présentaient les meilleures propriétés.

La rigidité des fibres de carbone engendre une importante quantité de fibres endommagées dans le tricot qui augmente avec la quantité de fils flottés. Par conséquent, les propriétés des *JC* en fibres de carbone sont plus affectées dans la direction colonne que celles en fibres de verre et de basalte. De plus l'amélioration des propriétés en traction rangée est moins importante pour les *JC* en fibres de carbone que pour les *JC* en fibres de verre et de basalte.

Les meilleures propriétés sont atteintes avec les tricots *JC3* en fibres de verre en traction rangée.

2.4.4 Comparaison du comportement des tricots jersey et jersey chargé avec un tissu satin

Dans la première partie du chapitre, la différence de comportement entre un textile tissé et un textile tricoté a été mise en évidence. L'objectif était de modifier la contexture jersey et d'approcher le comportement d'un tissu. La figure 2.43 synthétise les courbes d'effort déformation des tricots *JC* en fibres de verre sollicités en traction rangée comparée au du tissu satin.

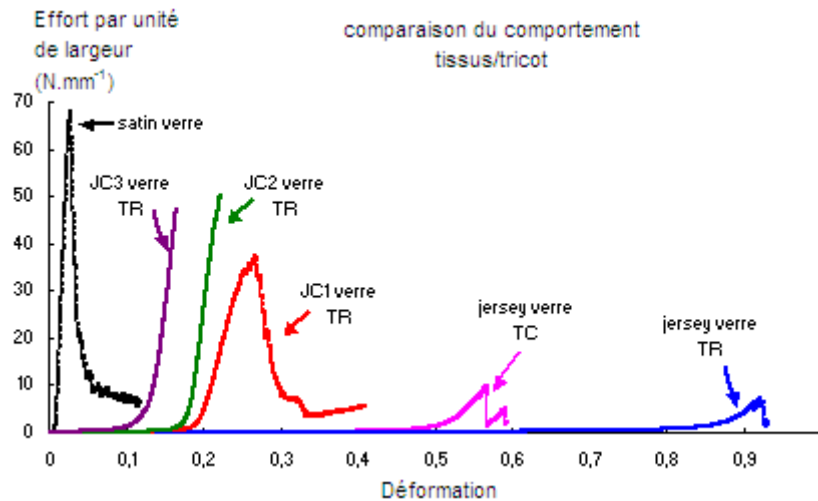


Figure 2.43 — Courbe d'effort-déformation des tricots jersey, *JC1*, *JC2* et *JC3* en traction rangée et d'un tissu satin en fibres de verre

Bien que les propriétés du tissu satin ne soient pas atteintes, les résultats obtenus en traction rangée avec les jersey chargés sont plus proches de ceux du tissu que du tricot jersey. Les résultats mettent en évidence que la modification d'une contexture peut avoir un effet considérable sur le comportement des textiles tricotés secs.

2.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, le comportement des tricots secs sollicités en traction uniaxiale a été étudié. L'étude du jersey et de la côte qui constituent la base des tricots simple et double fontures a permis de comprendre les mécanismes de déformation des textiles tricotés. Dans une première phase, une importante déformation structurale du tricot se produit jusqu'à un blocage des mailles à partir duquel les efforts sont transmis aux fibres et une déformation

physique du matériau a lieu. Dans les deux phases, la géométrie de la maille a une influence importante sur le comportement tandis que la nature de la fibre intervient essentiellement dans la seconde phase du comportement.

Les tricots secs simples sont plus déformables en rangée qu'en colonne. Les contextures jersey sont moins déformables que les contextures côte dans les deux directions de sollicitation. Après blocage des mailles la contexture jersey présente de meilleures propriétés mécaniques lorsque l'effort est rapporté à une colonne ou rangée de mailles et les meilleures performances sont obtenues dans la direction colonne de la contexture jersey en fibres de carbone.

Dans la seconde partie de ce chapitre, de nouvelles contextures basées sur le jersey ont été élaborées. Dans chaque rangée de la structure jersey ont été rajoutées une, deux ou trois mèches flottées. La présence de ces mèches a une faible influence sur le comportement du tricot sec sollicité dans la direction colonne. Elle intervient essentiellement sur la configuration de la maille dans son état initial et dans son état bloqué. Cependant elle améliore considérablement les propriétés dans la direction rangée dont le comportement se rapproche de celui des textiles tissés.

Ces différentes contextures ont été utilisées comme renfort pour la réalisation de matériaux composites par injection de résine époxy. Le comportement de ces composites est étudié dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Étude du comportement des composites à renfort tricoté

Sommaire

3.1	Élaboration des plaques	91
3.1.1	Les constituants	91
3.1.2	Mise en œuvre des composites par injection de résine	92
3.1.3	Plaques fabriquées et éprouvettes	96
3.2	Essais de traction uni axiale	97
3.2.1	Essais et instrumentation	97
3.2.2	Exploitation des résultats	98
3.2.3	Mesure des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images .	100
3.3	Comportement des composites à renfort tricoté simple	101
3.3.1	Analyse des résultats	102
3.3.2	Suivi et hétérogénéité des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images numériques	109
3.3.3	Observation des faciès de rupture	118
3.3.4	Conclusion sur le comportement des composites à renfort tricoté simple	125
3.4	Influence des fils flottés sur le comportement du composite . . .	125
3.4.1	Analyse des résultats	126
3.4.2	Mesures des champs de déformation par stéréo corrélation d'images numériques	134
3.4.3	Endommagement des composites à renfort JC	141
3.5	Conclusion du chapitre	148

L'objectif de ce chapitre est d'étudier expérimentalement le comportement des composites à renforts tricotés et de le mettre en relation avec l'architecture du renfort et la nature de la fibre. Des composites renforcés de textiles tricotés en fibres de verre, de basalte et de carbone sont élaborés par injection de résine. Les contextures des renforts tricotés sont identiques à celles étudiées dans le chapitre 2. Les composites fabriqués sont soumis à des essais de traction longitudinale dans trois directions du renfort : à 0° , qui correspond à la direction colonne du tricot, à 90° , qui correspond à la direction rangée du tricot et à 45° . La stéréo-corrélation d'images est également utilisée pour suivre l'évolution des champs de déformation sur la surface des éprouvettes et le mode d'endommagement est étudié par l'observation des faciès de rupture. De la même manière que dans le deuxième chapitre, l'étude du comportement des matériaux est divisée en deux parties : dans un premier temps, l'influence de l'architecture du renfort est étudiée à travers les contextures simple et double fontures basiques (le jersey et la côte) et dans un deuxième temps l'étude se consacre à l'effet de la présence de mèches non tricotées insérées dans la rangée du tricot jersey sur le comportement du composite.

3.1 Élaboration des plaques

3.1.1 Les constituants

3.1.1.1 La matrice

Pour l'élaboration des plaques composites, le choix s'est porté sur une résine époxyde pour ses propriétés mécaniques élevées et qui présente des facilités de stockage, de manipulation et de mise en œuvre. La résine utilisée est un système époxy à deux composants développé spécialement pour les procédés utilisant le transfert de résine (RTM / Infusion). Il est caractérisé par une très faible viscosité et de bonnes performances mécaniques, notamment en cisaillement interlaminaire. Ce système est composé de la résine époxy SICOMIN SR 1710 et du durcisseur SD 8822. Les caractéristiques de chacun des composants et du mélange sont données dans le tableau 3.1. Le comportement mesuré sur des éprouvettes en résine pure est faiblement non linéaire (Figure 3.1).

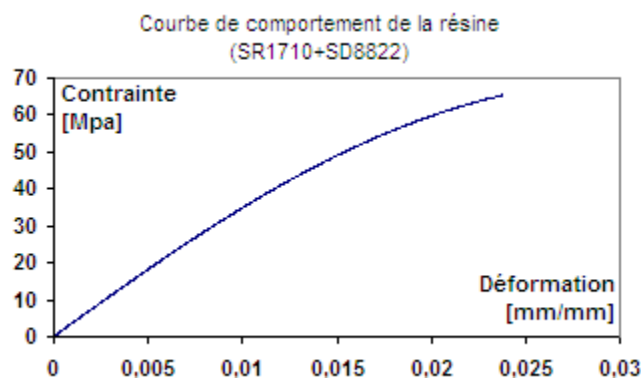


Figure 3.1 – Courbe de comportement en traction de la résine (SR1710+durcisseur SD8822)

	Résine SR1710i	Durcisseur SD8822
Viscosité à 20°C [mPA.s]	1700	20
Viscosité à 25°C [mPA.s]	950	16
Densité à 20°C [g.cm ⁻³]	1,15	0,937
	Mélange SR1710i/SD8822	
Dosage en poids	100g de SR1710i + 35g de SS8822	
Viscosité à 20°C [mPA.s]	500	
Viscosité à 25°C [mPA.s]	360	
Polymérisation : Cycle de cuisson préconisé	16h à 60°	
Caractéristiques mécaniques du mélange		
	Traction	
Module [MPa]	3680	
Résistance à la rupture [MPa]	85	
Allongement à la rupture [%]	3,1	
	Flexion	
Module [MPa]	3720	
Résistance maximale [MPa]	136	
Allongement à l'effort maximal [%]	5,2	

Tableau 3.1 – Caractéristiques de la résine pure (Données fabricant)

3.1.1.2 Les renforts tricotés

L'objectif est d'étudier le comportement du composite et de le mettre en relation avec l'architecture et la nature du renfort. Les renforts des composites sont de contextures identiques à celles des tricots secs étudiés dans le chapitre précédent et sont élaborés à partir des mèches de fibres de verre, de basalte et de carbone dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2.1 du chapitre 2. L'étude se consacre dans un premier temps aux contextures simples, le jersey et la côte dont les caractéristiques sont données dans le tableau 3.2 et dans un deuxième temps aux contextures *Jersey – flotté – chargé* dont les caractéristiques sont données dans le tableau 3.3.

	CÔTE			JERSEY		
	Verre	Basalte	Carbone	Verre	Basalte	Carbone
h [mm]	1,85	1,55	1,55	2,70	2,55	2,65
b [mm]	1,60	1,50	1,75	3,80	3,45	3,75
L_f [mm]	8,3	8,2	8,0	11,2	13,0	13,0
e [mm]	4,50	4,05	4,10	1,60	1,60	1,55
Densité surfacique [g.m ⁻²]	2282	2439	1493	844	914	596

Tableau 3.2 – Caractéristiques des renforts tricotés de contextures côte et jersey

3.1.2 Mise en œuvre des composites par injection de résine

3.1.2.1 Principe du procédé et paramètres de mise en œuvre

Le procédé de mise en œuvre utilisé pour l'élaboration des composites est une variante du procédé VARTM (décrit à la section 1.1.3) dans lequel l'imprégnation du renfort se fait par imprégnation simple de résine, proche de l'infusion et non par injection. Le schéma du

	JC1			JC2			JC3		
	VER	BAS	CAR	VER	BAS	CAR	VER	BAS	CAR
h [mm]	2,60	2,40	2,75	2,40	2,35	2,50	2,30	2,55	2,45
b [mm]	4,00	4,10	4,15	4,30	4,35	4,30	4,85	4,75	4,65
L_f [mm]	16,2	16,1	18,0	15,6	20,1	22,4	21,2	20,2	22,5
% $L_{f\text{lot}}$ (eq.2.4)	130	130	120	130	130	120	130	130	120
e [mm]	1,95	1,90	1,85	2,35	2,25	2,10	2,60	2,40	2,35
Densité surfaccique [g.m ⁻²]	1237	1305	820	1575	1518	1047	1774	1771	1193

Tableau 3.3 – Caractéristiques des renforts tricotés de textures JC1, JC2 et JC3

procédé est donné à la figure 3.2. Le renfort est préalablement positionné dans un moule fermé et rigide. Le mélange de résine est à température ambiante et pression atmosphérique. Une pompe à palettes tire le vide (pression absolue d'environ 1 mbar) aux évents pour permettre l'infusion de résine.

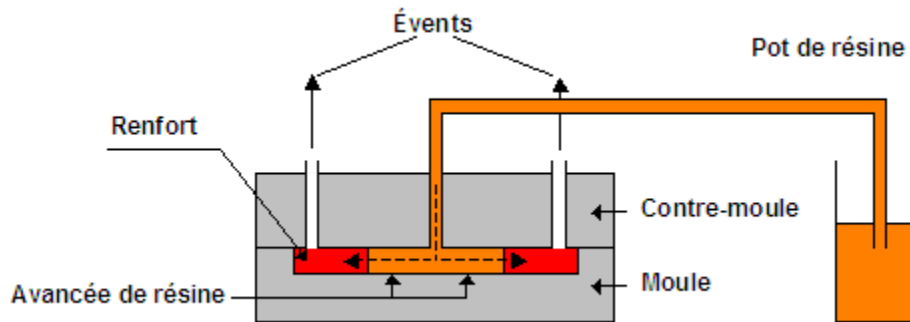


Figure 3.2 – Schéma du procédé de mise en œuvre des composites

L'utilisation d'un moule rigide permet de contrôler l'épaisseur des plaques et le taux de fibres dans le matériaux et également d'obtenir un bon état de surface. Une mise en œuvre par tirage du vide et à température ambiante a été choisie du fait de la faible viscosité de la résine et de la forte perméabilité des renforts tricotés. Les résultats de mesures de viscosité réalisés en isotherme à 20°C sur le mélange résine+durcisseur, donnés en annexe D, montrent que la viscosité de la résine reste faible pendant une dizaine d'heures. Des mesures de perméabilité réalisées au laboratoire donnent des valeurs de 10.10^{-10} m^2 dans la direction rangée et de 19.10^{-10} m^2 dans la direction colonne du tricot côte [85] et de 11.10^{-10} m^2 dans la direction rangée et 47.10^{-10} m^2 dans la direction colonne du jersey [84]. L'ensemble de ces valeurs concernent les tricots en fibres de verre. Des simulations d'imprégnation de renforts tricotés simples réalisées avec PAM-RTM ont permis d'estimer des temps de remplissage allant de 2 à 10 minutes selon les types de renfort dans les conditions décrites ci-dessus [86].

3.1.2.2 Procédure de mise en œuvre utilisée

Le moule utilisé pour la mise en œuvre des plaques composites, présenté à la figure 3.3, est en alliage d'aluminium 7075. Sa cavité a une profondeur réglable de 3 à 8 mm et une surface de $400 \times 400 \text{ mm}^2$.

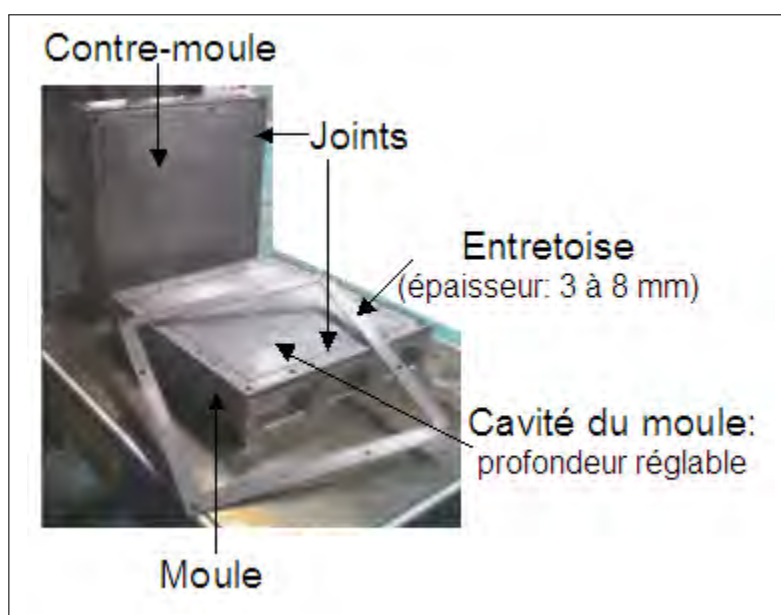


Figure 3.3 – Moule de mise en œuvre des plaques composites

La figure 3.4 présente le poste de mise en œuvre des plaques composites. Le moule est réglé pour réaliser des plaques de 3 mm d'épaisseur. Ses surfaces sont enduites d'un agent démoulant (Loctite 44 NC Freekote) avant de draper le renfort. Après fermeture du moule, une pression de vide de 1 $mbar$ est appliquée aux événements situés aux quatre coins du moule et l'arrivée de résine a lieu au niveau d'un point d'injection situé au centre du moule. Le mélange de résine est effectué juste avant l'injection. Le pot de résine reste à température ambiante et pression atmosphérique. Une balance et un chronomètre sont utilisés pour suivre l'évolution de l'injection en fonction du temps (Figure 3.5.a). Le temps de remplissage varie entre 1,5 et 25 minutes selon le type de renfort et la température de la salle.

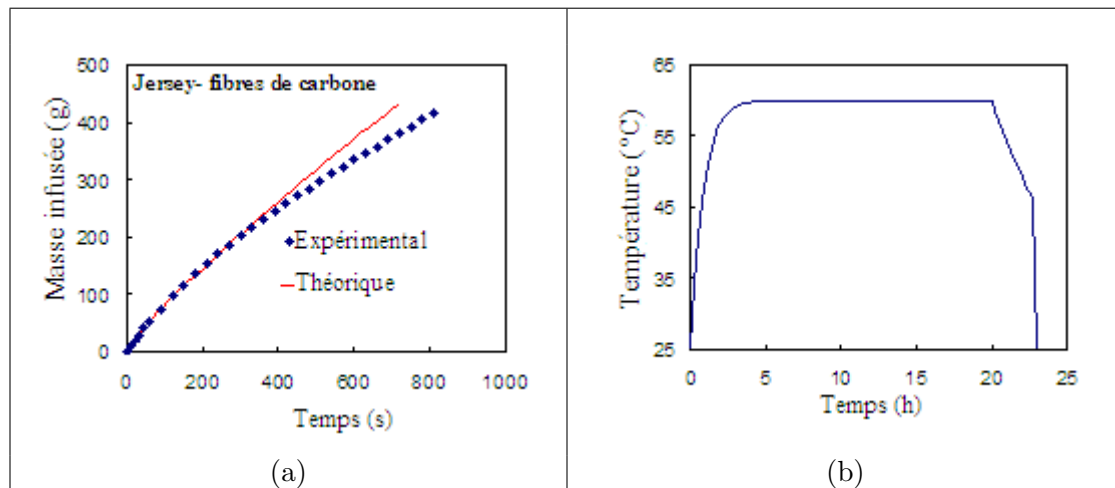


Figure 3.5 – (a) Suivi de l'injection de résine; (b) Mesures de température à l'entrefer du moule

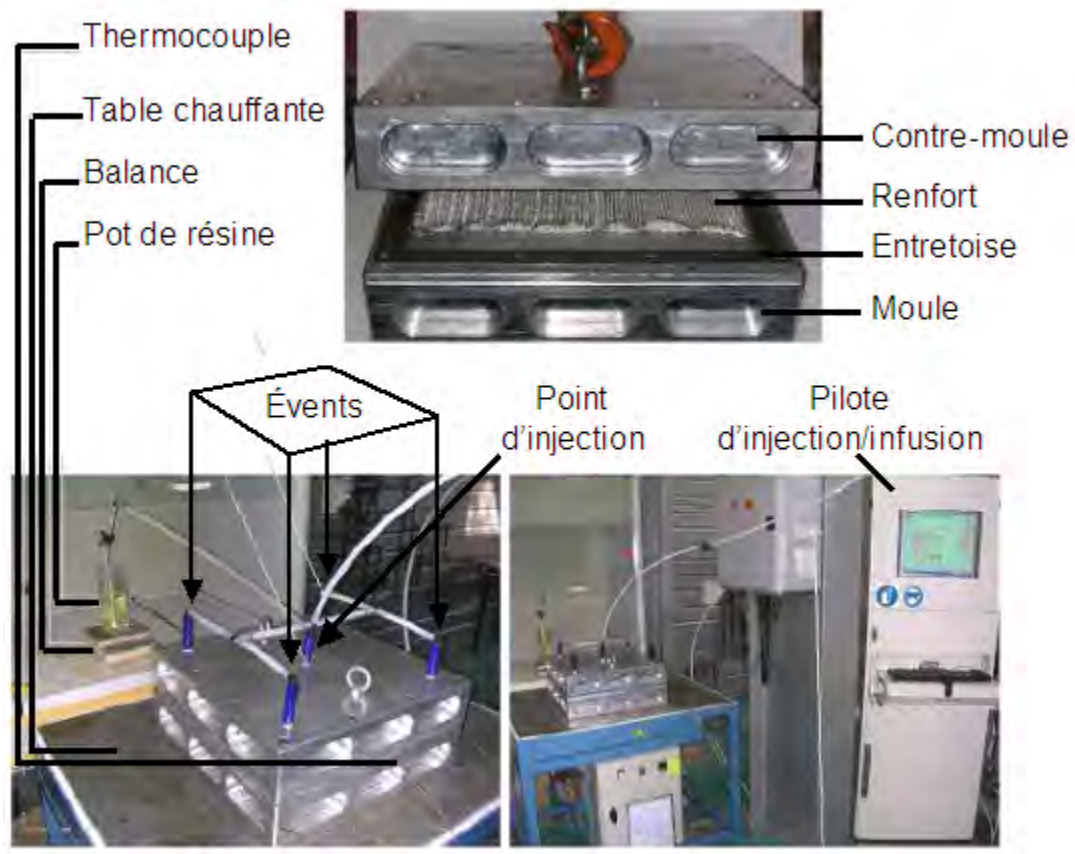


Figure 3.4 – Poste de mise en œuvre des composites

Le moule est ensuite positionné sur une table chauffante réglée à $70^{\circ}C$ pour obtenir une température de $60^{\circ}C$ dans la cavité du moule. Des thermocouples permettent de mesurer la température à l'entrefer du moule. La cuisson a lieu pendant $16h$ à $60h$ comme préconisé par le fabricant (Figure 3.5.b). La plaque est démoulée après refroidissement du moule à température ambiante.

3.1.3 Plaques fabriquées et éprouvettes

Une plaque a été fabriquée par type de renfort. Toutes les plaques sont de mêmes dimensions ($400 \times 400 \text{ mm}^2$ de surface et 3 mm d'épaisseur). Le nombre de plis a été défini pour obtenir des taux de fibres équivalents pour les composites à renfort côte, jersey et JC1. Les composites à renfort JC2 et JC3 ont le même nombre de plis que le composite à renfort JC1. Pour déterminer le nombre de plis, le taux de fibres théorique $V_f(th)$ a été estimé avec la formule suivante :

$$V_f(th) = \frac{n_{pli} \times m_{stricot}}{\rho_f \times e_c} \times 100 \quad (3.1)$$

Avec :

- n_{pli} : Nombre de plis de renfort dans le composite
- e_c : Épaisseur de la plaque composite [m]

Dans le tableau 3.4 sont donnés les taux volumiques de fibres théoriques calculés pour des plaques composites de 3 mm d'épaisseur à partir des densités surfaciques de chaque type de renfort (cf. tableaux 3.2 et 3.3). Les composites seront élaborés avec un pli de côte, trois plis de jersey et deux plis de JC1 pour atteindre des taux de fibres d'environ 30%. Les taux de fibres des composites renforcés de JC2 et de JC3 sont estimés à respectivement 40% et 45%.

Contexture	Côte	Jersey	JC1	JC2	JC3
Nature de fibre	1 pli	3 plis	2 plis	2 plis	2 plis
Verre	29%	32%	31%	40%	45%
Basalte	30%	34%	32%	37%	44%
Carbone	28%	34%	31%	40%	45%

Tableau 3.4 – Estimation des taux volumiques théoriques de fibres dans les plaques composites

3.1.3.1 Santé-matière des plaques fabriquées

La santé-matière des éprouvettes est déterminée par leur taux de porosité. Celui-ci est évalué par une méthode de double pesée, pesée de l'éprouvette et pesée du renfort. Le pourcentage de porosité $p(\%)$ est estimé par la formule suivante :

$$p(\%) = \frac{Vol_{ep} - Vol_f - Vol_r}{Vol_{ep}} \times 100 \quad (3.2)$$

Vol_{ep} est le volume total de l'éprouvette donné par :

$$Vol_{ep} = H_{ep} \times L_{ep} \times e_c \quad (3.3)$$

H_{ep} , L_{ep} et e_c étant respectivement les hauteur, largeur et épaisseur mesurées des éprouvettes. Vol_f et Vol_r sont respectivement les volumes de fibres et de résine contenus dans le

composite et donnés par :

$$Vol_f = \frac{m_f}{\rho_f} = \frac{n_{pli} \times m_{stricot} \times H_{ep} \times L_{ep}}{\rho_f} \quad (3.4)$$

$$Vol_r = \frac{m_r}{\rho_r} = \frac{m_{ep} - m_f}{\rho_r} = \frac{m_{ep} - (n_{pli} \times m_{stricot} \times H_{ep} \times L_{ep})}{\rho_r} \quad (3.5)$$

Avec :

- m_f : Masse de fibres dans l'éprouvette (g)
- m_r : Masse de résine dans l'éprouvette (g)
- ρ_r : Densité de la résine ($g.m^{-3}$)
- m_{ep} : Masse de l'éprouvette (g)

Le tableau 3.5 donne les taux de fibres calculés à partir de l'épaisseur mesurée des éprouvettes et le taux de porosité moyen obtenu pour chaque plaque.

	Renfort	Côte	Jersey	JC1	JC2	JC3
V_f	Verre	27%	31%	29%	38%	43%
	Basalte	28%	32%	31%	35%	41%
	Carbone	27%	32%	30%	37%	42%
$p(\%)$	Verre	0,6%	2,8%	5,4%	7,1%	5,4%
	Basalte	2,5%	3,4%	8,4%	7,5%	6,6%
	Carbone	1,3%	2,6%	10,1%	4,1%	3,2%

Tableau 3.5 – Valeurs des taux de fibres et des taux de porosités des plaques composites

Les taux de porosité estimés varient entre 0,6% et 10,1%. Les composites renforcés de tricots simples présentent des taux de porosité faibles (allant de 0,6% à 3,4%) tandis que les composites à renfort JC ont des taux de porosité allant de 3,2% à 10,1%.

3.2 Essais de traction uni axiale

3.2.1 Essais et instrumentation

Les essais sont effectués en suivant la norme ASTM D3039/D3039M. Les éprouvettes sont découpées dans les plaques composites à l'aide d'une scie circulaire équipée d'un disque à diamants pour être sollicitées dans les direction 0°, 45° et 90° du renfort (Figure 3.6). Les échantillons de composite renforcés de tricots simples et de tricots jersey-chargé sont respectivement de dimensions $20 \times 180 \text{ mm}^2$ et $25 \times 200 \text{ mm}^2$ (Figure 3.7). Les dernières sont plus larges pour permettre d'obtenir au minimum une cellule unitaire représentative du renfort dans la largeur de l'éprouvette, sachant qu'une cellule unitaire est de la dimension d'une rangée par quatre colonnes de mailles (Figure 2.33). Des talons en aluminium sont collés aux extrémités supérieures et inférieures des éprouvettes pour éviter les concentrations de contraintes dans les zones de serrage, laissant une longueur utile de 100 mm.

Le montage d'essai est présenté à la figure 3.8. Les essais sont réalisés sur une machine électromécanique Instron 5800R dont les caractéristiques sont données dans la section 2.2.1.1. Le logiciel Bluehill d'Instron est utilisé pour commander, contrôler les essais et acquérir les données. Les essais sont pilotés en déplacement avec une vitesse constante de la traverse de $0,5 \text{ mm.min}^{-1}$. Les éprouvettes sont instrumentées avec 2 extensomètres. Un premier extensomètre d'une longueur de jauge de 50 mm mesure la déformation dans la direction de

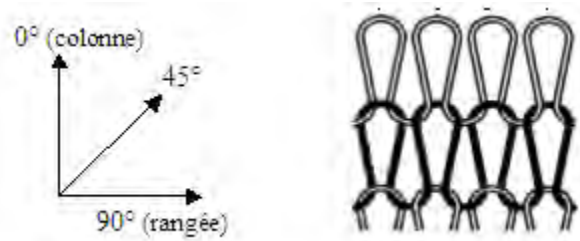


Figure 3.6 – Directions 0° , 45° et 90° du renfort

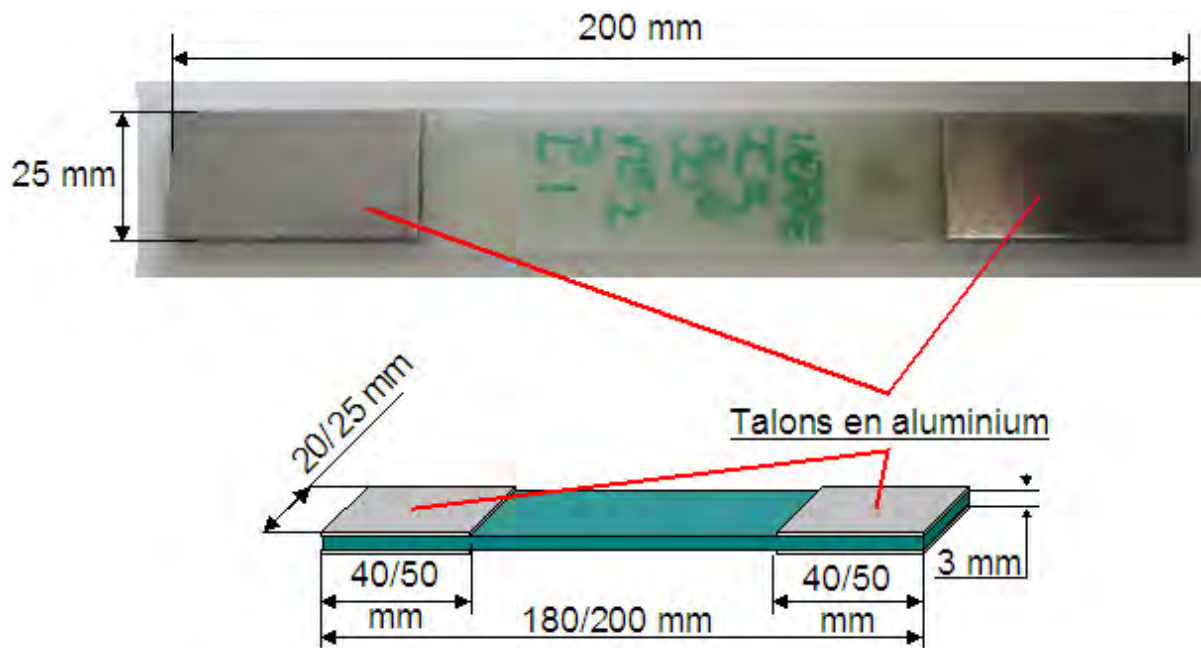


Figure 3.7 – Éprouvette de traction sur composite

sollicitation et un deuxième d'une longueur de jauge de 12,5 mm mesure la déformation dans la direction transverse.

3.2.2 Exploitation des résultats

Les données brutes collectées avec le logiciel Bluehill d'Instron sont la charge appliquée et les déformations longitudinales et transverses. Les résultats sont donnés en contrainte (σ en MPa) en fonction de la déformation longitudinale (ϵ). La contrainte est calculée à partir de la charge appliquée F et de la section de l'éprouvette à l'état initial S_0 par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3.6)$$

Les déformations longitudinales et transversales sont calculées par le logiciel Bluehill à partir du déplacement mesuré par les extensomètres de la manière suivante :

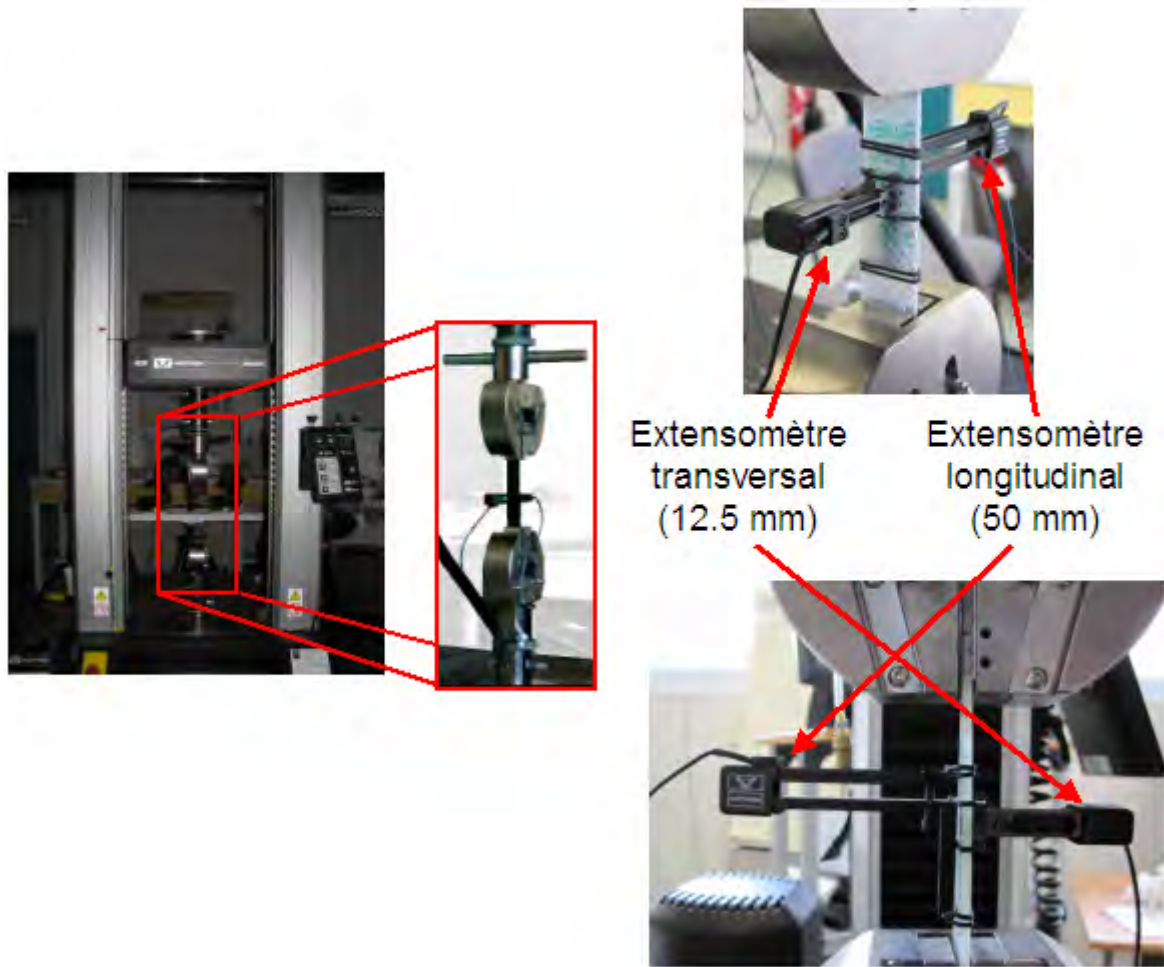


Figure 3.8 – Montage de l'essai de traction sur composite

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.7)$$

Avec :

- $\Delta l = l - l_0$
- l : écartement entre les pinces de l'extensomètre à l'instant t
- l_0 : écartement entre les pinces de l'extensomètre à l'instant initial

Une courbe typique de comportement d'un composite à renfort tricoté est donnée dans la figure 3.9.

Le comportement mécanique du matériau composite à renfort tricoté est élastique endommageable et se traduit par une courbe de comportement en deux phases : la première, linéaire, correspond au domaine élastique et la seconde correspond au domaine endommageable du comportement. La caractérisation mécanique du matériau consiste à déterminer sa rigidité et sa résistance. La rigidité est caractérisée par le module élastique E_L qui correspond à la pente de la courbe de comportement dans le domaine élastique et la résistance est caractérisée par la contrainte à la rupture σ_r . Le coefficient de Poisson ν permet de caractériser la contraction

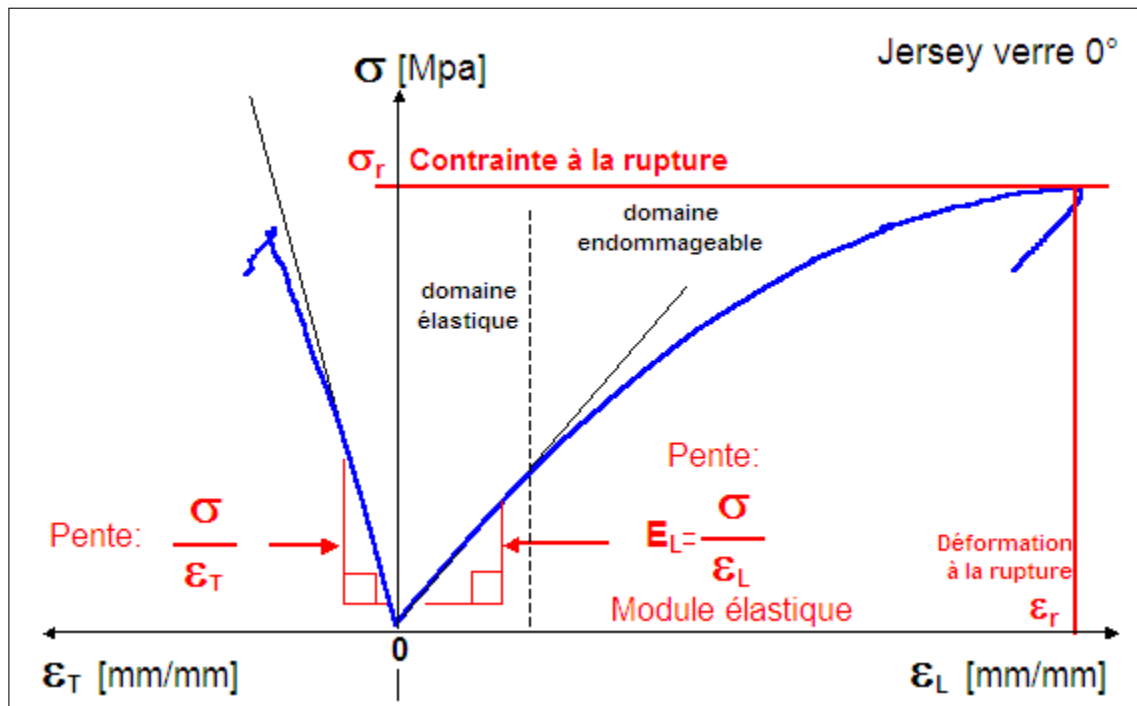


Figure 3.9 – Courbe de contrainte déformation d'un composite à renfort tricoté

de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué dans le domaine élastique. Il correspond au rapport de la contraction transverse sur l'élongation longitudinale de l'éprouvette et est obtenu par la relation suivante :

$$\nu = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_L} \quad (3.8)$$

3.2.3 Mesure des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images

La stéréo-corrélation d'images a été utilisée pour mesurer l'évolution des champs de déformations sur la surface des éprouvettes pendant l'essai de traction.

3.2.3.1 Principe de la stéréo-corrélation d'images numériques

La stéréo-corrélation d'images est une méthode optique non intrusive de mesure de formes 3D et de champs de déformation sur la surface d'un objet. Elle est basée sur le principe de la corrélation d'images qui permet de mesurer des champs de déformation couplé au principe de la stéréo-vision qui permet de mesurer la forme 3D d'un objet. Son principe est détaillé dans l'annexe E.

3.2.3.2 Matériel utilisé

Le banc de stéréovision est composé de deux caméras CCD Q-Imaging Retiga 1300 (Figure 3.10). L'acquisition des images est réalisée avec le logiciel Vic-snap. La synchronisation des caméras est réalisée par un trigger externe. Le calibrage des caméras est effectué en utilisant

une mire de 9×9 points séparés de 3 mm . La corrélation d'image ainsi que le calcul des champs de déformation sont réalisés avec le logiciel Vic-3D. Pour obtenir une surface texturée, les éprouvettes sont préparées en appliquant un mouchetis blanc sur fond noir par projection de peinture en bombe (Figure 3.11).

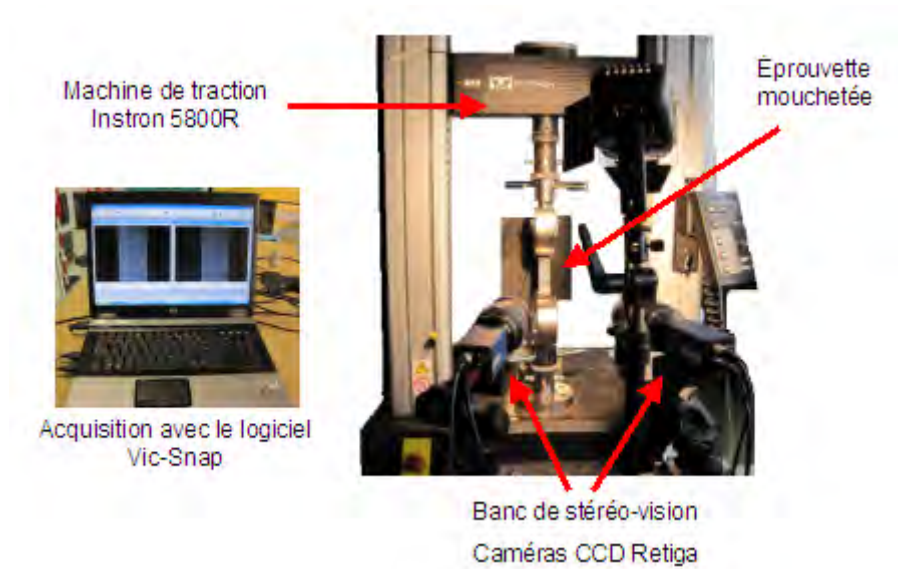


Figure 3.10 – Poste d'essai de stéréo-corrélation



Figure 3.11 – Éprouvette mouchetée utilisée pour la stéréo-corrélation d'images

3.3 Comportement des composites à renfort tricoté simple

Dans un premier temps, l'étude se porte sur les composites renforcés de tricots de contextures simples qui sont la côte et le jersey.

3.3.1 Analyse des résultats

Chaque type d'essai (même texture de renfort, même nature de fibre, même direction de sollicitation) a été réalisé trois fois. L'ensemble des courbes est donné dans l'annexe F et la répétabilité des essais est analysée figure 3.12. Elle représente les propriétés mécaniques (E_L et σ_r) déterminées à partir des méthodes présentées à la section 3.2.2 pour l'ensemble des essais de même configuration. La valeur moyenne et l'écart-type des propriétés mécaniques déterminées pour chaque essai de même configuration sont données dans le tableau 3.6. Les figures 3.13 et 3.14 présentent les courbes de comportement en fonction respectivement de la nature de la fibre et de la direction de sollicitation. Pour une meilleure lecture graphique, une courbe représentative de chaque essai a été choisie. La courbe de contrainte-déformation de la résine pure est également représentée sur chaque graphique.

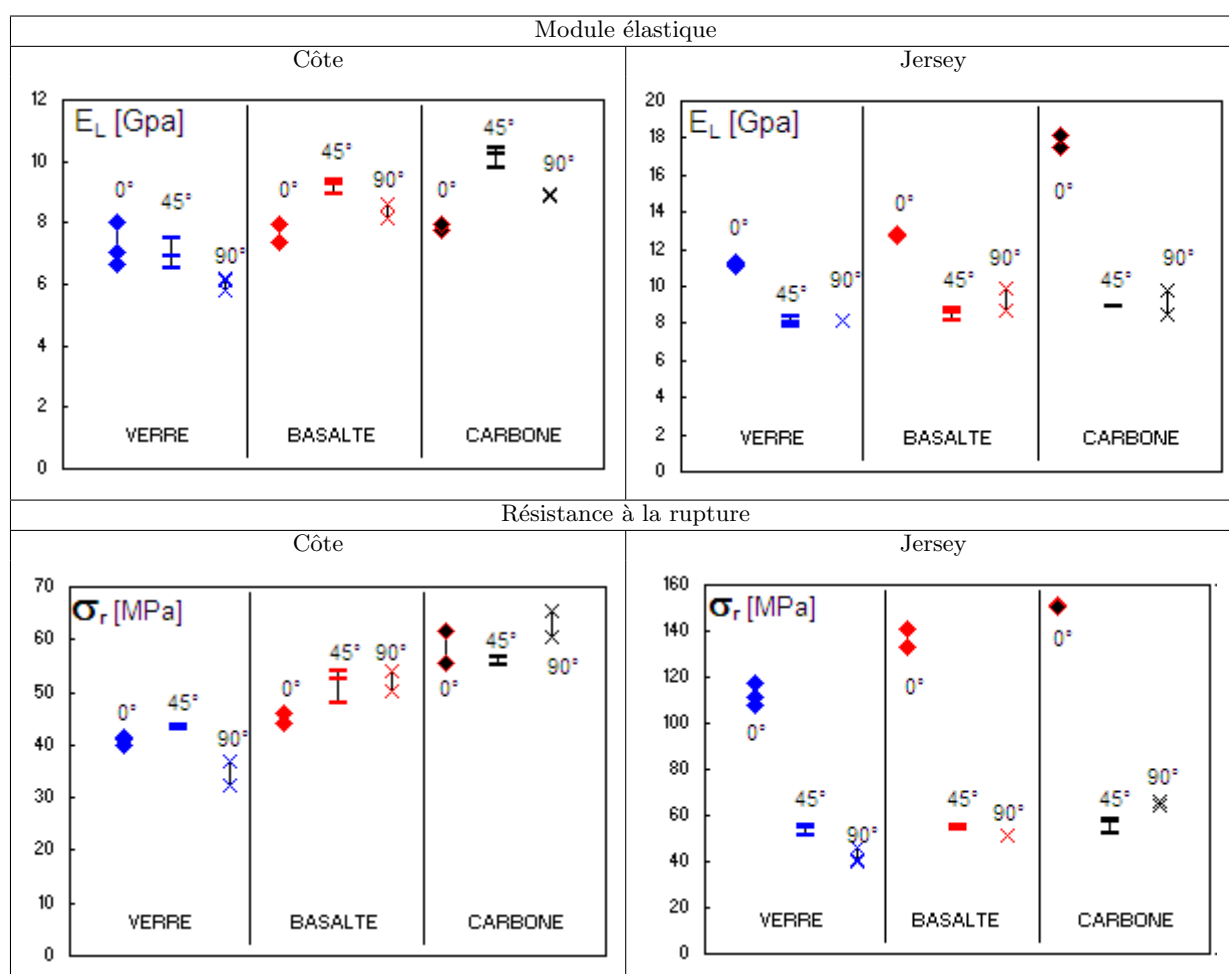


Figure 3.12 – Propriétés mécaniques déterminées pour l'ensemble des essais réalisés

Des différences dans le comportement et les propriétés mécaniques du composite sont observées selon l'architecture du renfort, la nature de la fibre ou la direction de sollicitation. La présence du renfort tricoté dans la résine entraîne systématiquement une augmentation de la rigidité du matériau avec une augmentation du module élastique de la résine allant de 70%, pour le composite le moins rigide jusqu'à 360%, pour le matériau le plus rigide. La présence

3.3. Comportement des composites à renfort tricoté simple

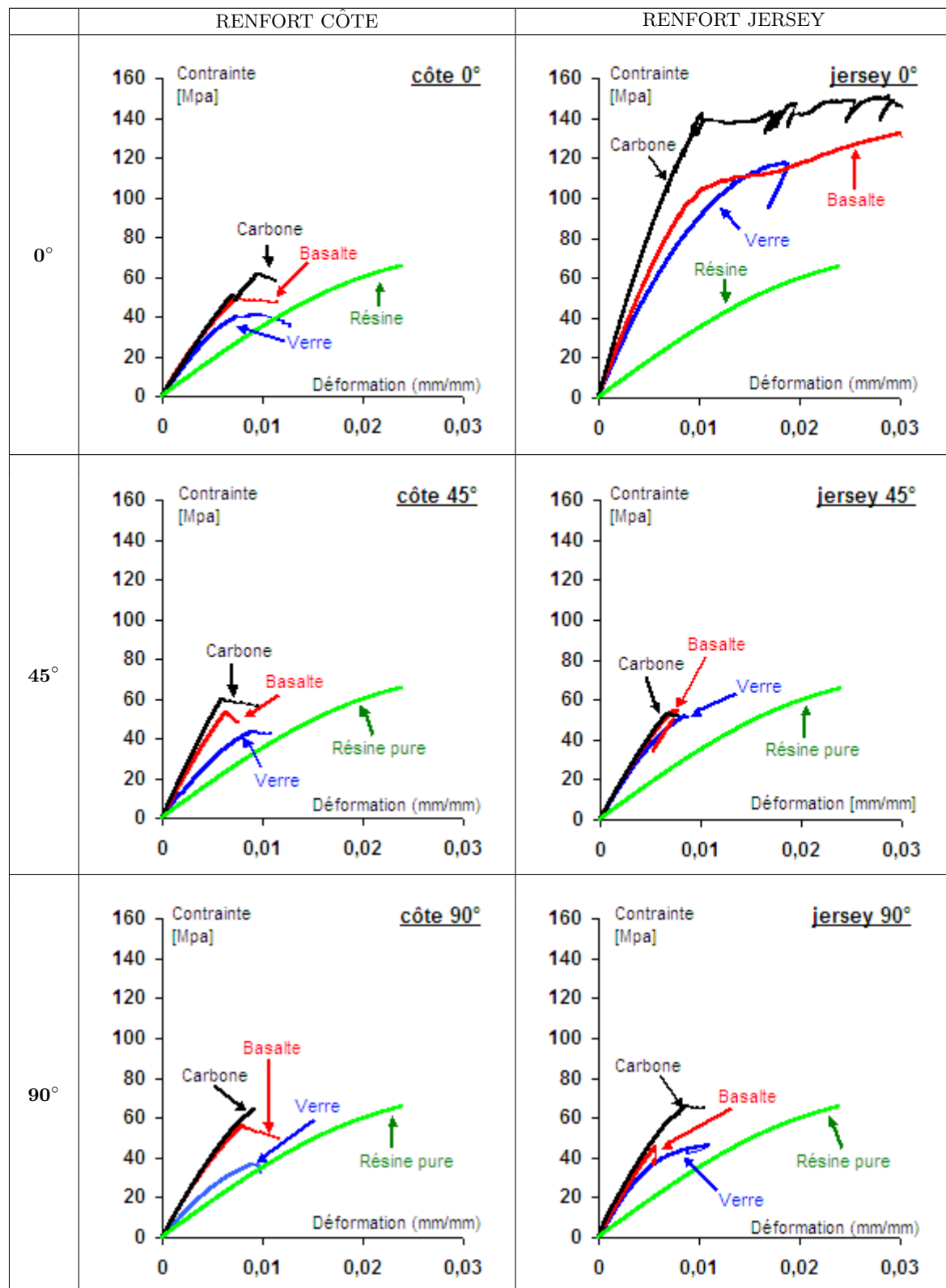


Figure 3.13 – Représentation des courbes de comportement des composites renforcés de textiles tricotés simples en fonction de la nature de fibre

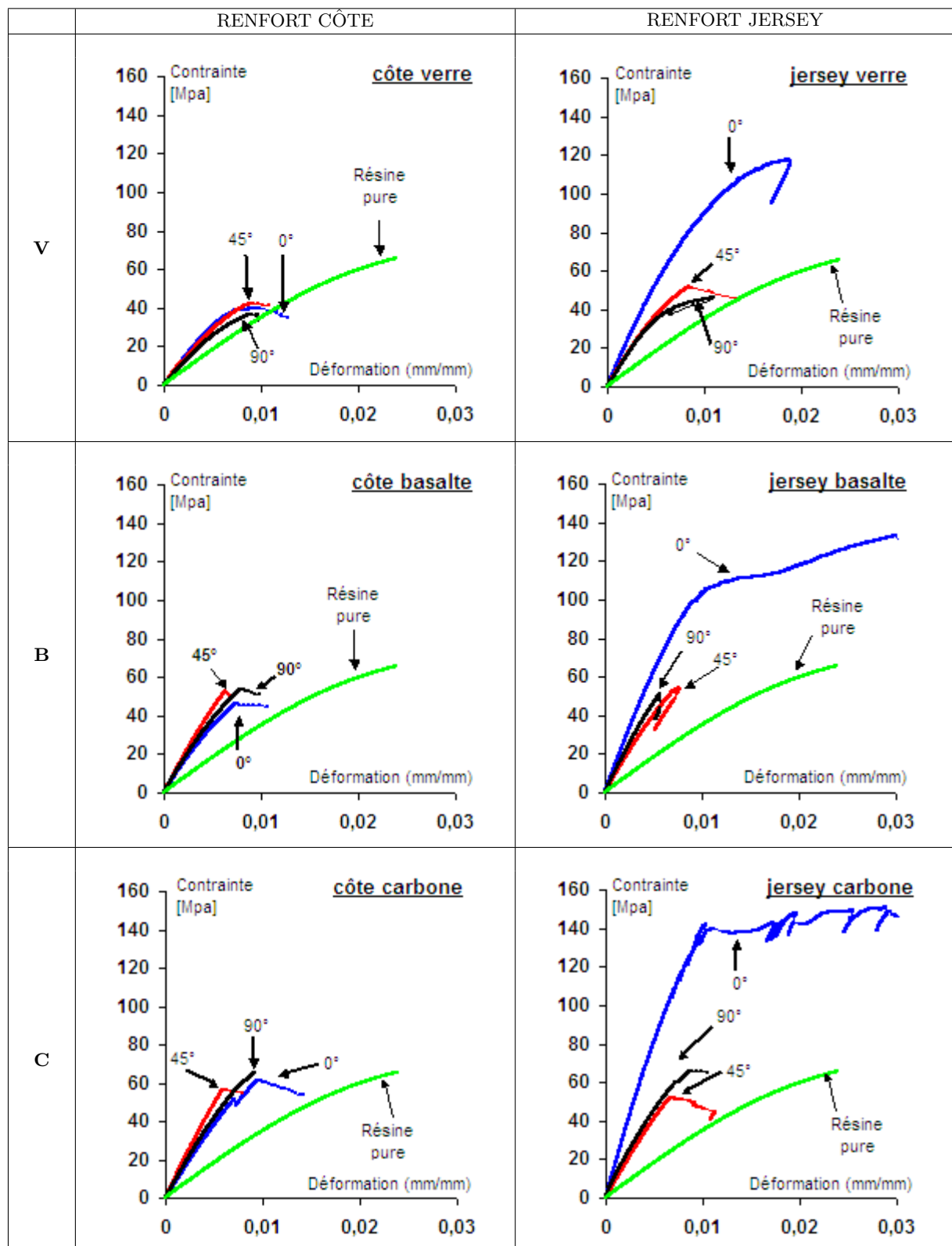


Figure 3.14 – Représentation des courbes de comportement des composites renforcés de textiles tricotés simples en fonction de la direction de sollicitation

3.3. Comportement des composites à renfort tricoté simple

		CÔTE		
		Verre	Basalte	Carbone
0°	$E_L(0^\circ)$ [GPa]	$7,2 \pm 0,7$	$7,7 \pm 0,4$	$7,8 \pm 0,1$
	$\nu_{12}(0^\circ)$	$0,31 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,09$	$0,35 \pm 0,02$
	R_m [MPa]	$40,8 \pm 0,7$	$45,1 \pm 1,3$	$58,6 \pm 4,3$
45°	$E_L(45^\circ)$ [GPa]	$7,0 \pm 0,5$	$9,2 \pm 0,2$	$10,1 \pm 0,4$
	$\nu_{12}(45^\circ)$	$0,36 \pm 0,02$	$0,29 \pm 0,02$	$0,24 \pm 0,04$
	R_m [MPa]	$43,3 \pm 0,4$	$51,5 \pm 3,3$	$56,2 \pm 1,0$
90°	$E_L(90^\circ)$ [GPa]	$6,0 \pm 0,2$	$8,4 \pm 0,2$	$8,9 \pm 0,0$
	$\nu_{12}(90^\circ)$	$0,37 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,01$	$0,45 \pm 0,06$
	R_m [MPa]	$35,4 \pm 2,7$	$52,8 \pm 2,2$	$63,0 \pm 3,4$
		JERSEY		
		Verre	Basalte	Carbone
0°	$E_L(0^\circ)$ [GPa]	$11,2 \pm 0,1$	$12,8 \pm 0,1$	$17,5 \pm 0,7$
	$\nu_{12}(0^\circ)$	$0,35 \pm 0,08$	$0,28 \pm 0,04$	$0,57 \pm 0,04$
	R_m [MPa]	$112,2 \pm 4,8$	$136,9 \pm 5,4$	$152,1 \pm 2,0$
45°	$E_L(45^\circ)$ [GPa]	$8,1 \pm 0,1$	$8,5 \pm 0,3$	$8,9 \pm 0,0$
	$\nu_{12}(45^\circ)$	$0,40 \pm 0,07$	$0,53 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,02$
	R_m [MPa]	$54,1 \pm 2,2$	$54,8 \pm 0,9$	$55,6 \pm 3,2$
90°	$E_L(90^\circ)$ [GPa]	$8,2 \pm 0,0$	$9,3 \pm 0,8$	$9,3 \pm 0,7$
	$\nu_{12}(90^\circ)$	$0,27 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,00$	$0,29 \pm 0,01$
	R_m [MPa]	$42,3 \pm 3,4$	$51,1 \pm 0,3$	$63,3 \pm 3,6$
		Résine pure (données expérimentales)		
	E [GPa]	3,62		
	ν	0,4		
	G [GPa]	1,29		
	R_m [MPa]	65,5		

Tableau 3.6 – Propriétés des composites à renforts tricotés de contexture côte et jersey et de la résine époxy (sicomin SR1710 + durcisseur SD8822)

du renfort tricoté dans la résine entraîne cependant une diminution plus ou moins importante de la contrainte maximale quelles que soient la contexture, la direction de sollicitation et la nature de la fibre, sauf dans le cas du composite renforcé d'un tricot jersey sollicité dans la direction 0° (où la contrainte maximale atteinte est de 1,7 à 2,3 fois supérieure à celle de la résine pure selon la nature de fibre).

Dans la suite de l'étude, les influences de la nature de la fibre, de la contexture du renfort et de la direction de sollicitation sont étudiées successivement. Pour mettre en évidence leur impact sur les propriétés, les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes représentant les valeurs moyennes et les écart-types des modules élastiques et des contraintes maximales déterminés à partir de l'ensemble des essais de même configuration.

3.3.1.1 Influence de la nature de la fibre sur les propriétés du composite

Sur la figure 3.15 sont représentés les histogrammes donnant les modules élastiques et les contraintes maximales en fonction de la nature de la fibre pour une même contexture de renfort et une même direction de sollicitation.

Quelles que soient la contexture du renfort et la direction de sollicitation, les renforts en fibres de carbone confèrent au composite les meilleures propriétés mécaniques tandis que les renforts en fibres de verre confèrent au matériau les plus faibles propriétés. L'effet de la nature

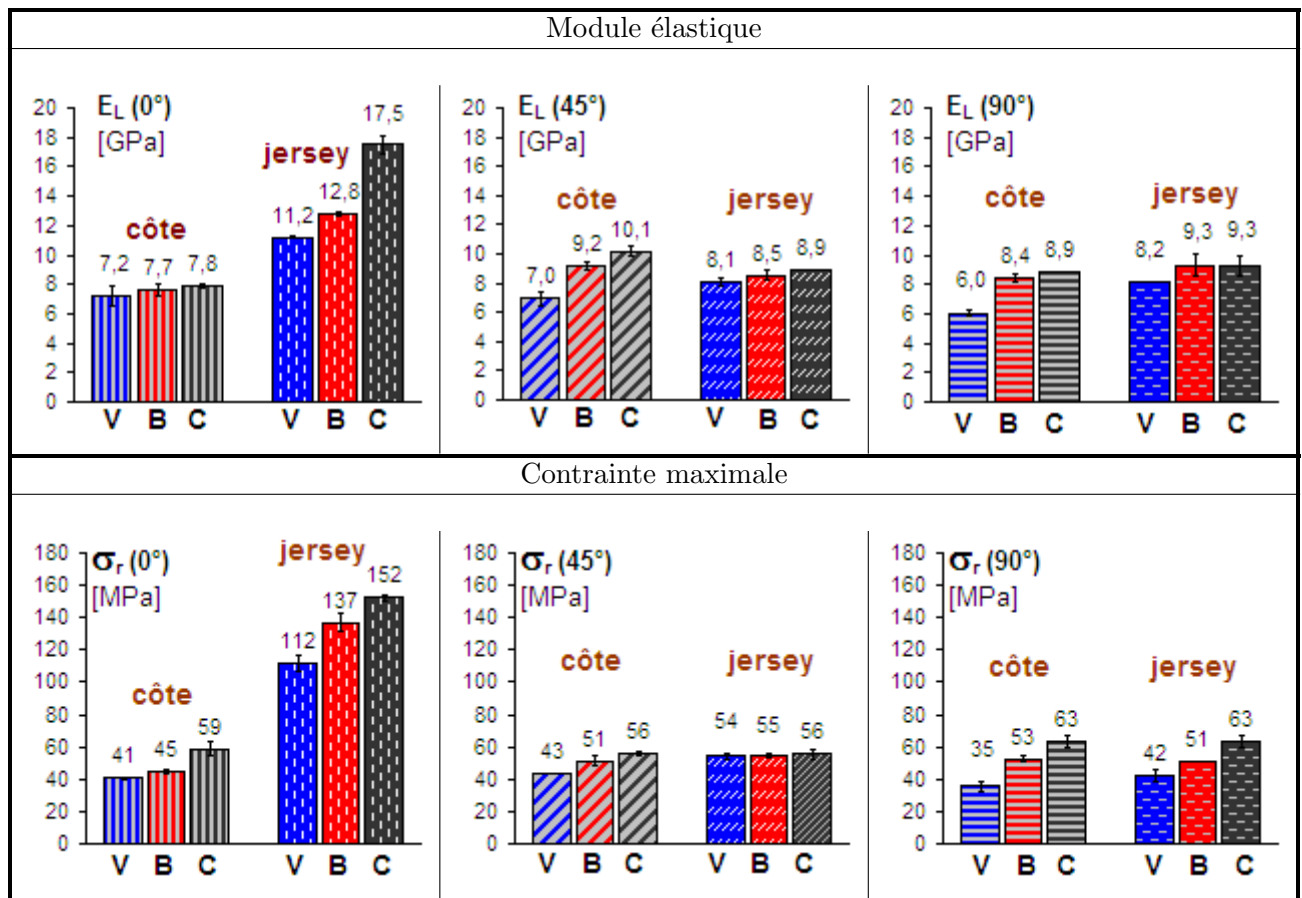


Figure 3.15 – Histogrammes donnant les modules élastiques et contraintes maximales des composites à renforts tricotés simples en fonction de la nature de la fibre

de la fibre sur les propriétés du composite est plus ou moins prononcé selon l'architecture du renfort ou la direction de sollicitation. Avec un renfort de contexture côte, la nature de la fibre a une influence significative sur les propriétés du composite dans les trois directions de sollicitations, sauf sur le module apparent dans la direction 0° . Avec un renfort de contexture jersey, la nature de la fibre a une importante influence sur les propriétés du composite dans la direction 0° , et sur la contrainte à la rupture à 90° tandis qu'elle est faible sur les propriétés dans la direction 45° et sur le module dans la direction 90° .

Les courbes de la figure 3.13 montrent une différence de comportement selon la nature de la fibre. Le comportement d'un composite à renfort tricoté est élastique endommageable quelle que soit la nature de la fibre. Cependant, le domaine endommageable des composites renforcés de fibres de carbone est peu marqué, leur comportement est proche d'un comportement élastique fragile. Les courbes de comportement des composites renforcés de fibres de verre présentent un domaine endommageable très marqué avant rupture se traduisant par une importante non-linéarité de la courbe après le domaine élastique. Le domaine endommageable des composites renforcés de fibres de basalte est moins marqué, leur comportement est plus proche de celui des composites renforcés de fibres de carbones excepté dans le cas d'une sollicitation à 0° avec un renfort jersey. Les composites à renfort jersey en fibres de basalte et de carbone sollicités dans la direction 0° , atteignent de hauts niveaux de déformation après la rupture de la matrice, à partir de laquelle les fibres continuent d'assurer les liaisons entre les deux parties de l'éprouvette rompue.

3.3.1.2 Propriétés des composites selon la direction de sollicitation

La figure 3.16 présente les histogrammes des modules élastiques et des contraintes maximales en fonction de la direction de sollicitation pour une même nature de fibre et une même contexture de renfort. Les propriétés obtenues varient selon la direction de sollicitation et de manière plus ou moins prononcée selon la contexture du renfort. Les composites à renfort jersey sont fortement anisotropes avec des propriétés mécaniques beaucoup plus élevées dans la direction 0° , et proches dans les directions 45° et 90° . Un module légèrement plus important est obtenu à 90° et une contrainte maximale plus élevée est atteinte à 45° pour les composites renforcés de fibres de verre et de basalte. Des propriétés plus élevées sont obtenues à 90° avec un renfort en fibres de carbone. Dans le cas d'un renfort de contexture côte, les différences de comportement liées à la direction de sollicitation sont plus modérées. Les propriétés mécaniques sont très proches dans les trois directions de sollicitation. La rigidité et la résistance sont plus importantes à 0° et 45° pour les composites renforcés de fibres de verre. Concernant les composites renforcés de fibres de basalte et de carbone, un plus haut module est obtenu à 45° . Une contrainte à rupture plus élevée est atteinte à 90° , cependant, en considérant les écart-types, cette caractéristique n'est pas significative.

L'observation des courbes de comportement de la figure 3.14 permet de constater que le comportement des composites à renforts tricotés est similaire dans les trois directions de sollicitation sauf dans le cas de la direction 0° du composite à renfort jersey en fibres de basalte et carbone qui présentent une déformation importante mais seulement après rupture de la matrice.

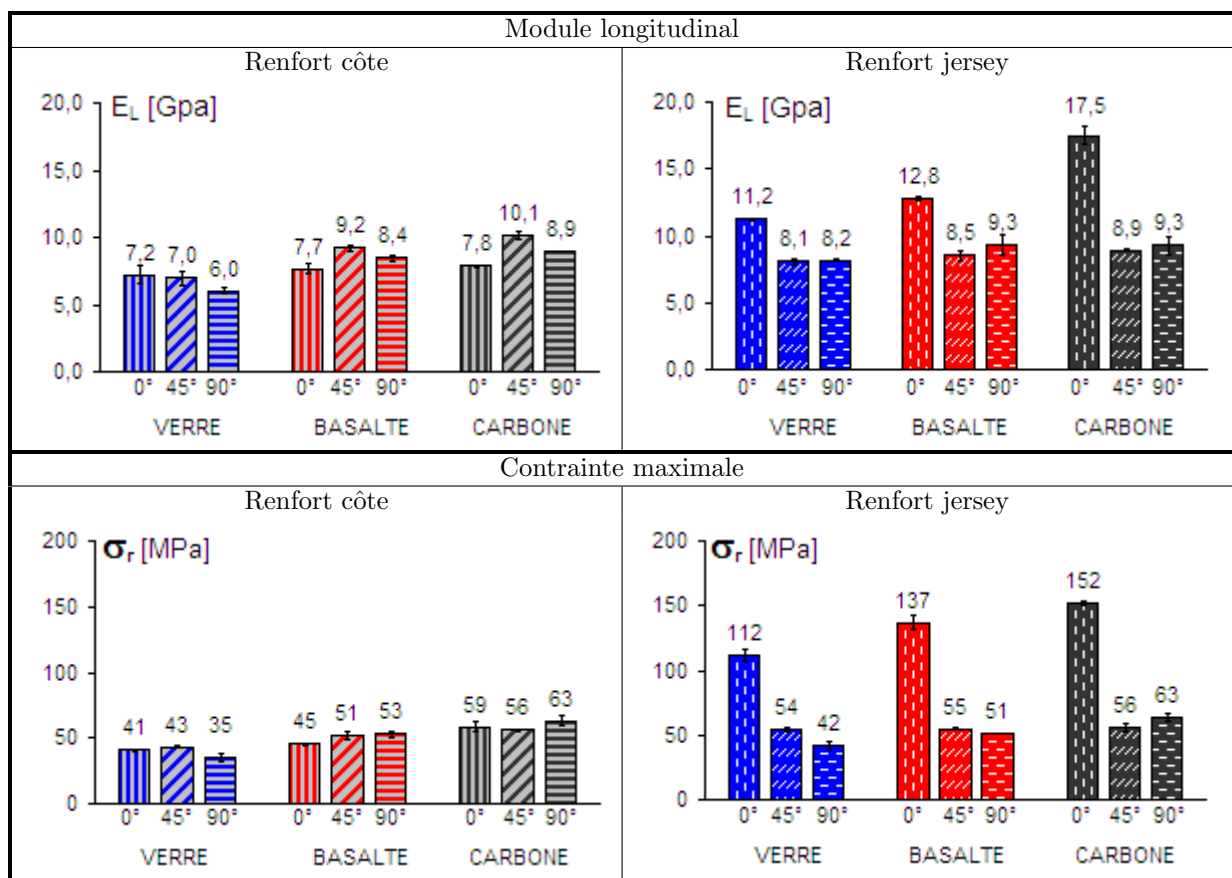


Figure 3.16 – Histogrammes donnant les modules élastiques et contraintes maximales des composites à renforts tricotés simples en fonction de la direction de sollicitation

3.3.1.3 Influence de la contexture du renfort sur les propriétés du composite

L'observation des courbes de comportement de la figure 3.14 et des histogrammes de la figure 3.16 montre une différence de comportement liée à l'architecture du renfort. Les composites renforcés de tricots côte présentent un comportement quasi-isotrope dans le plan, tandis que le composite à renfort jersey présente un comportement fortement anisotrope avec une augmentation significative des propriétés dans la direction 0° . Sur la figure 3.17 sont représentés les histogrammes donnant les modules élastiques et les contraintes maximales en fonction de la contexture. L'influence de la contexture du renfort sur les propriétés des composites est plus ou moins prononcée selon les directions de sollicitation et la nature de la fibre. Sollicités dans la direction 0° , les composites à renfort jersey présentent des propriétés fortement supérieures aux composites à renfort côte avec un module élastique 1,5 à 2,2 fois supérieur et une contrainte à la rupture 2,5 à 3 fois plus élevée selon la nature de la fibre. L'influence de la contexture du renfort est plus modérée à 45° et 90° . Élaboré en fibres de verre, le renfort de contexture jersey confère au composite des propriétés plus élevées que le renfort de contexture côte. Les modules apparents des composites renforcés de fibres de basalte et de carbone sont plus élevés avec une contexture côte dans la direction 45° et avec une contexture jersey dans la direction 90° . Les contraintes maximales atteintes avec les composites renforcés de fibres de basalte et de carbone sollicités à 45° et 90° sont équivalentes avec les contextures côte et jersey, en considérant les écart-types.

3.3.1.4 Synthèse de l'analyse des courbes de comportement

L'analyse des courbes de comportement a permis de mettre en évidence les différences de comportement et de propriétés mécaniques des composites à renforts tricotés simples en fonction de l'architecture du renfort et de la nature de la fibre dans différentes directions du composite. Les meilleures propriétés sont obtenues avec des composites renforcés de tricot jersey et sollicités à 0° . Les composites à renfort côte présentent un comportement quasi-isotrope dans le plan avec des propriétés proches dans les trois directions de sollicitation tandis que les composites à renfort jersey présentent un comportement fortement anisotrope avec des propriétés plus importantes à 0° et des propriétés proches à 45° et 90° . La nature de la fibre a une influence plus ou moins prononcée sur le comportement du composite selon la direction de sollicitation et la nature du renfort. Les composites renforcés de fibres de carbone présentent les meilleures propriétés. Le comportement du composite à renfort tricoté est élastique endommageable. Le comportement des matériaux renforcés de fibres de carbone et de basalte est proche d'un comportement élastique fragile, tandis que le comportement des composites renforcés de fibres de verre, dont les propriétés atteintes sont plus faibles, présentent un endommagement avant rupture plus important.

3.3.2 Suivi et hétérogénéité des champs de déformation par stéréo-corrélation d'images numériques

La stéréo-corrélation d'images permet d'observer la distribution des champs de déformation sur la surface d'une éprouvette pendant l'essai de traction. La figure 3.18 présente l'évolution de la distribution des déformations longitudinales (ϵ_{xx}) pendant un essai de traction opéré sur des composites renforcés de tricots jersey et côte. La première image est prise à la fin du domaine élastique du comportement, la deuxième, dans le domaine endommageable et la dernière, juste avant la rupture du matériau. Pour chaque image, trois valeurs de déformation

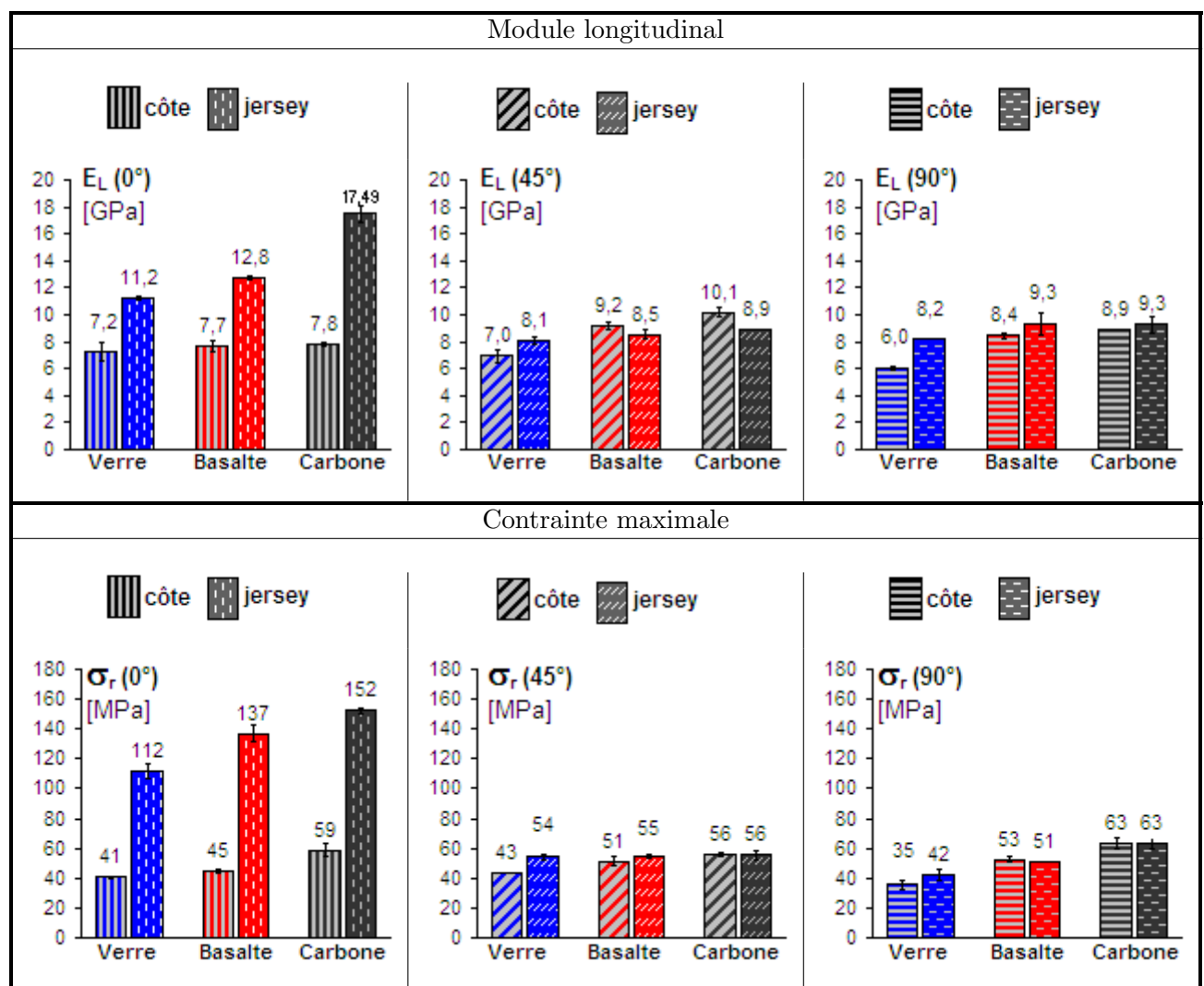


Figure 3.17 – Histogrammes donnant les modules élastiques et contraintes maximales des composites à renforts tricotés simples en fonction de la contexture

en % sont données : la valeur de déformation minimale, la valeur de déformation moyenne et la valeur de déformation maximale calculées sur la surface. Pour tous les niveaux de déformation, un champ de déformation hétérogène est observé à la surface des éprouvettes dessinant un motif périodique proche de la dimension d'une maille. Au cours de l'essai, les champs de déformation s'organisent pour dessiner un motif spécifique en forme de bandes transversales dans le cas des essais à 0° et 90° et en forme de bandes orientées à 45° dans le cas des essais à 45° .

La suite de l'étude se concentre sur la distribution des champs de déformation dans la phase endommageable du comportement. Les figures 3.19 et 3.20 présentent les résultats obtenus pour l'ensemble des essais réalisés avec stéréo-corrélation sur les composites à renfort jersey et côte respectivement. Sur chaque image sont également représentés une photo du renfort ainsi qu'une des dimensions de la maille. Dans tous les cas, les champs de déformation sont organisés selon un motif périodique particulier.

3.3.2.1 Distribution des champs de déformation sur un composite à renfort jersey

La figure 3.19 présente les champs de déformation longitudinale obtenus pour l'ensemble des essais réalisés avec stéréo-corrélation sur les composites à renfort jersey. Les composites à renfort jersey sollicités à 0° en fibres de verre présentent un motif sous forme de bandes transversales continues orientées perpendiculairement à la direction de sollicitation. La distance entre deux bandes est de la hauteur d'une rangée de mailles. Les champs de déformation des composites à renfort jersey en fibres de carbone s'organisent en un motif périodique discontinu de la dimension d'une maille se présentant sous formes de stries orientées à 45° . Les composites à renfort jersey sollicités à 45° et 90° présentent également une distribution des champs de déformation sous forme de bandes parallèles. Dans le cas d'une sollicitation à 45° , les bandes sont orientées dans la direction colonne du renfort, formant un angle de 45° avec la direction de sollicitation. Dans le cas d'une sollicitation à 90° , les bandes sont orientées perpendiculairement à la direction de sollicitation, dans la direction colonne, comme à 45° . La distance entre deux bandes de même niveau de déformation est de la largeur d'une demi colonne, sauf dans le cas du composite renforcé de fibres de verre et sollicité à 45° où elle est de la largeur d'une colonne.

La distribution des déformations est liée à l'architecture du renfort. L'observation des champs de déformation permettent de localiser des zones de forte et de faible déformation et de les associer à une partie spécifique du renfort (Figure 3.21). Les zones de fortes déformations sont localisées dans les zones riches en résine et les zones de faibles déformations sont localisées dans les zones riches en fibres. Dans le cas d'une sollicitation à 0° d'un composite à renfort jersey en fibres de verre, les zones riches en fibres atteignant de faibles niveaux de déformations correspondent aux têtes des mailles (Figure 3.21) et dans le cas d'un composite à renfort jersey en fibres de carbone, les zones de forte déformation correspondent au centre des mailles riches en résine (Figure 3.19). Dans le cas des sollicitations à 45° et 90° , les zones de faible déformation correspondent aux jambes des mailles (Figure 3.21) avec cisaillement des zones riches lors d'une sollicitation à 45° et traction transverse de la mèche fibreuse lors d'une sollicitation à 90° .

La figure 3.22 présente les champs de déformation longitudinaux, transverses et de cisaillement mesurés sur la surface du composite à renfort jersey sollicité à 0° et 90° .

Les champs de déformation dessinent dans tous les cas des motifs périodiques de la dimension d'une maille. Lors d'une sollicitation à 0° , les champs de déformation transverses

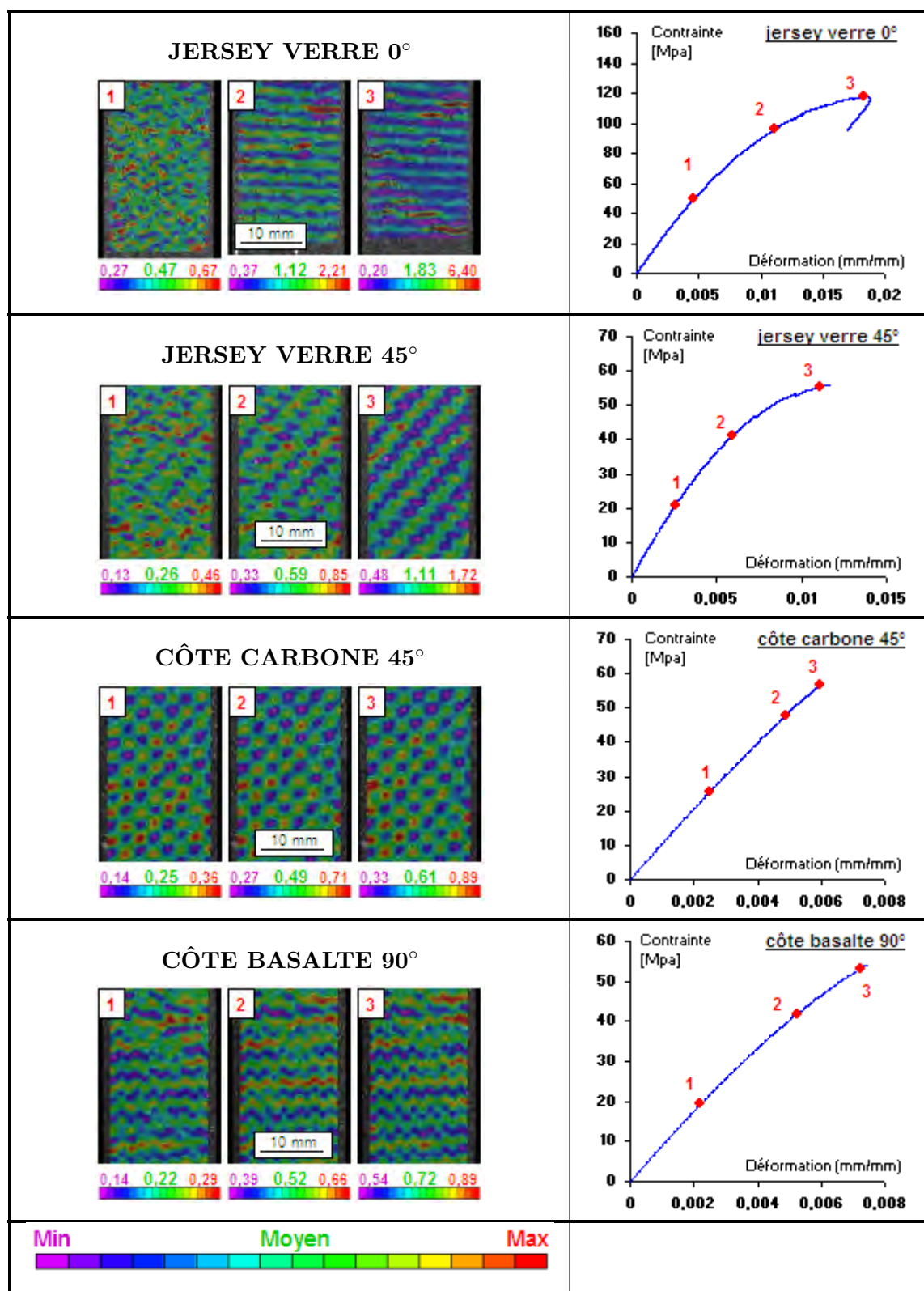


Figure 3.18 – Évolution des champs de déformation longitudinale au cours d'un essai de traction sur composite à renfort jersey et côte

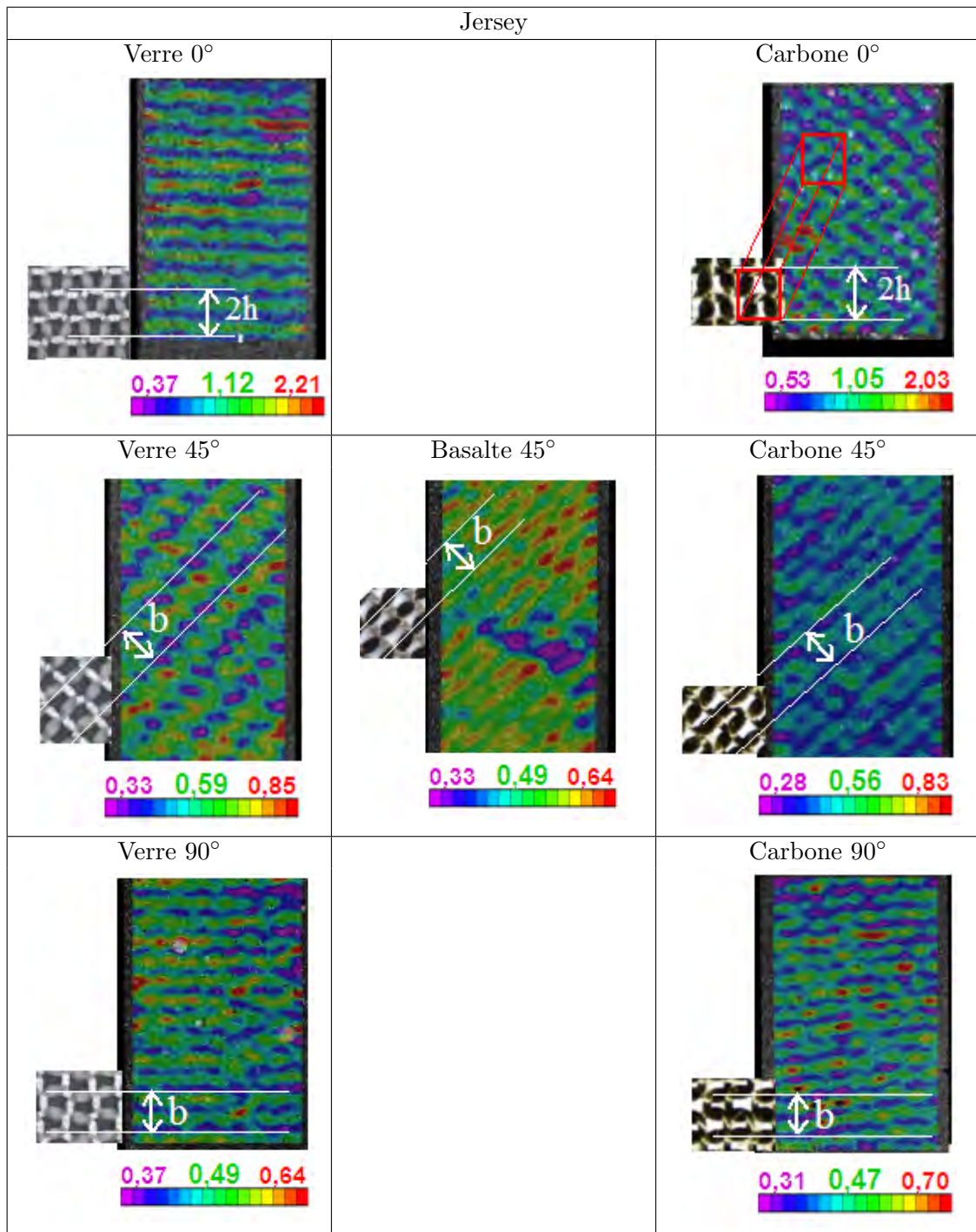


Figure 3.19 – Distribution des champs de déformation longitudinale à la surface des composite à renfort jersey

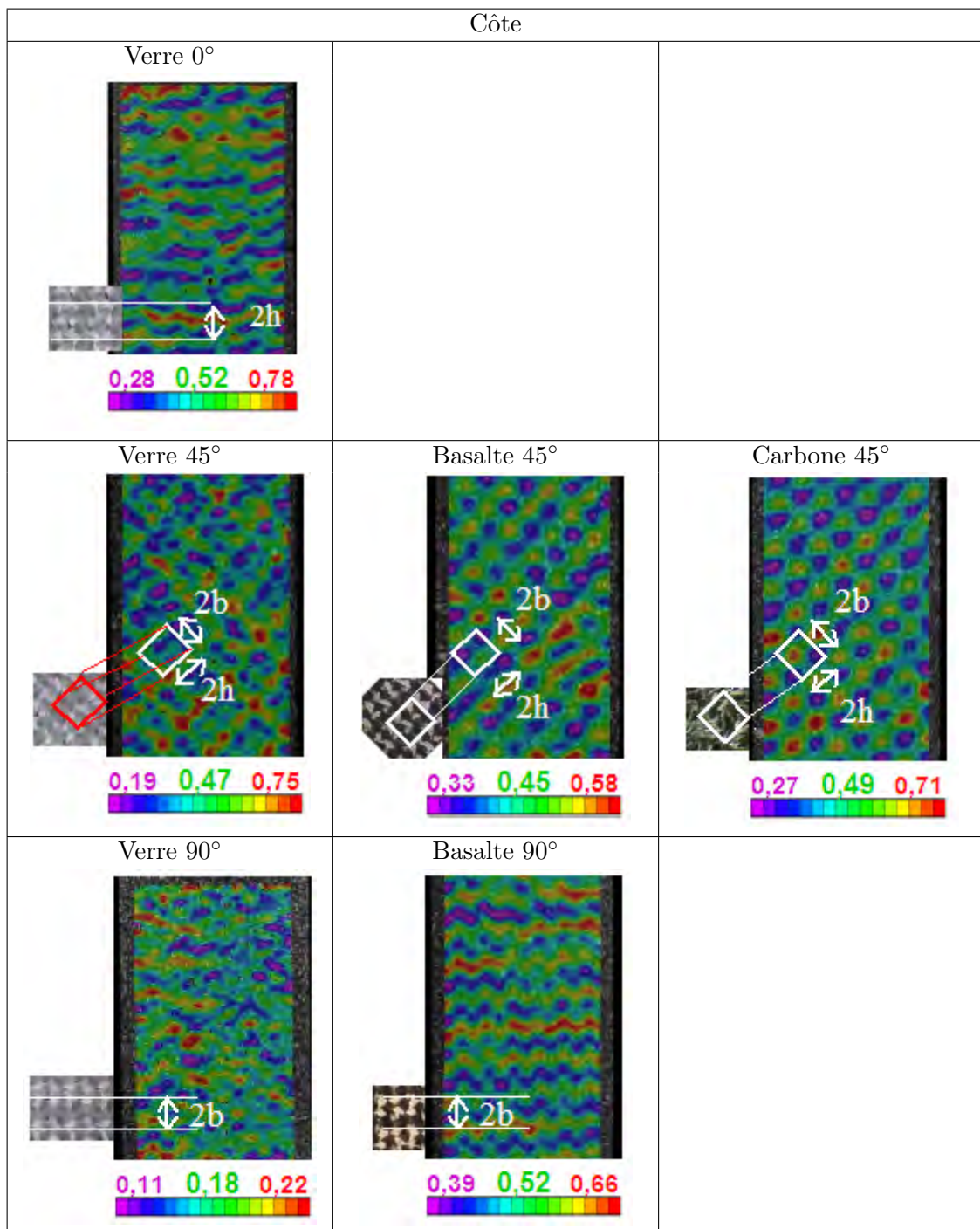


Figure 3.20 – Distribution des champs de déformation longitudinale à la surface des composite à renfort côte

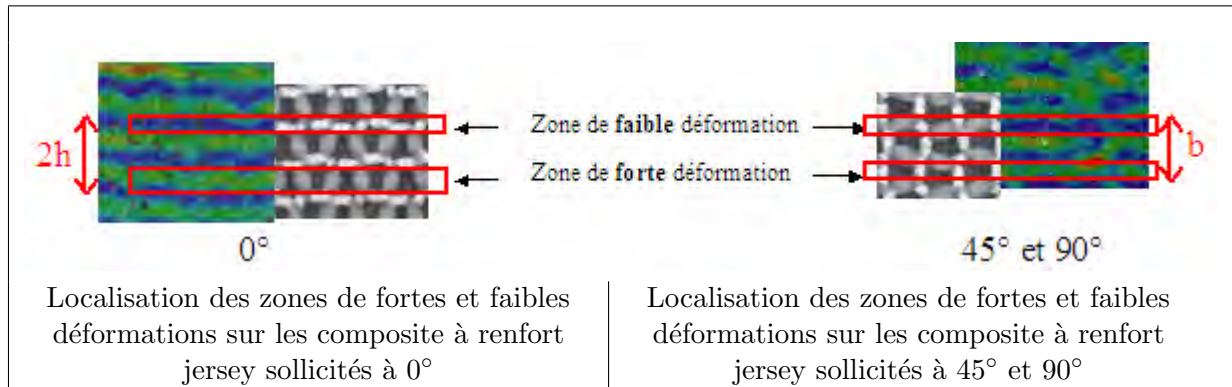


Figure 3.21 – Localisation des zones de faibles et de fortes déformations sur la surface des composites à renfort jersey

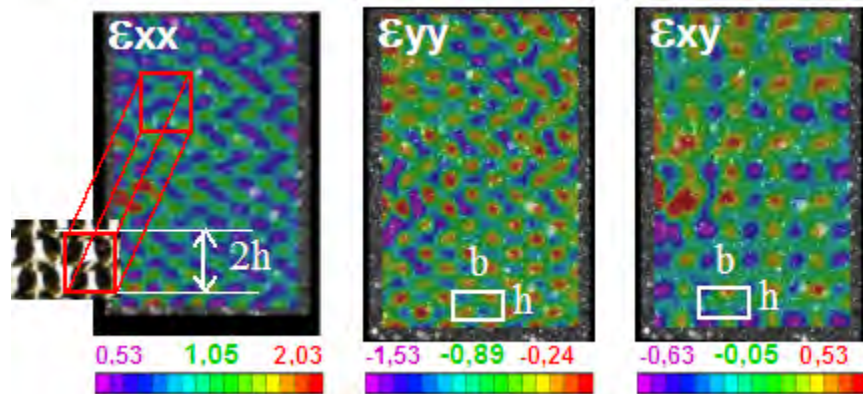
dessinent un motif similaire aux champs de déformations longitudinaux avec des zones de plus faibles et plus fortes déformations localisées. Les champs de déformation de cisaillement s'organisent en un motif régulier périodique de la taille d'une maille, alternant sur une même colonne de mailles une bande de zones localisées d'extension et une bande de zones localisées de contraction. Lors d'une sollicitation à 90° , un champ de déformation transverse hétérogène est observé sur la surface de l'éprouvette avec des déformations de même niveau s'orientant préférentiellement dans la direction de sollicitation. Les déformations de cisaillement dessinent un motif orienté dans la direction transverse à la sollicitation.

3.3.2.2 Distribution des champs de déformation longitudinale sur un composite à renfort côte

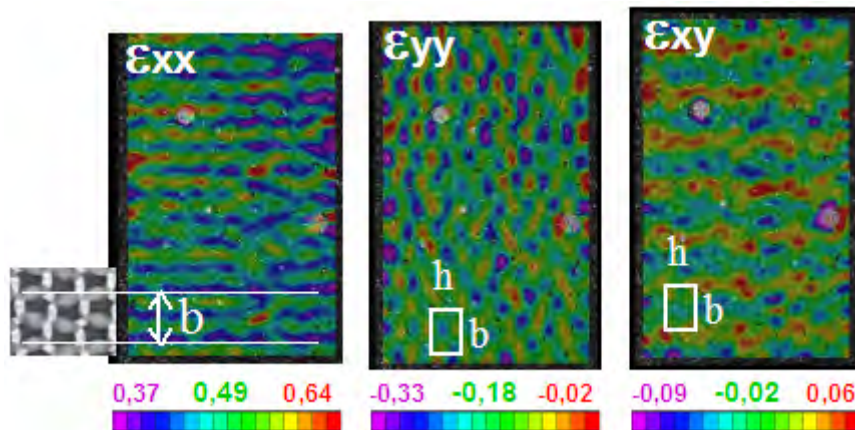
La figure 3.20 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des essais réalisés avec stéréocorrélation sur les composites à renfort côte. Dans tous les cas, les champs de déformation dessinent un motif orienté perpendiculairement à la direction de sollicitation pour les composites sollicités à 0° et 90° et orienté d'un angle de 45° avec la direction de sollicitation pour les composites sollicités à 45° . En comparaison avec les motifs obtenus pour les composites à renfort jersey, ceux-ci sont plus discontinus.

Dans le cas d'une sollicitation à 0° , les champs de déformation s'organisent en stries orientées perpendiculairement à la direction de sollicitation. Le motif observé ne présente pas de répétition périodique, cependant les distances entre deux stries de faible déformation sont de la hauteur de deux rangées de mailles. Il est difficile de déterminer précisément les zones de fortes et faibles déformations puisque la distance entre deux stries est plus importante que la hauteur d'une rangée. Malgré cela, l'observation de la géométrie des tricots côtes, alternant des mailles avant et arrière, montre que les mèches fibreuses, fortement courbées, ressortent en surface au niveau des jambes des mailles et plongent au cœur du composite au niveau des têtes des mailles pour permettre le passage d'une maille avant à une maille arrière (Figure 3.23). Les zones de faible déformation doivent donc être localisées au niveau des jambes des mailles, et les zones de forte déformations doivent se situer au niveau des têtes des mailles.

Dans le cas d'une sollicitation à 45° , les champs de déformation s'organisent pour dessiner



Champs de déformation longitudinaux ϵ_{xx} , transverses ϵ_{yy} et de cisaillement ϵ_{xy} mesurés sur la surface d'un composite à renfort jersey en fibres de carbone sollicité à 0°



Champs de déformation longitudinaux ϵ_{xx} , transverses ϵ_{yy} et de cisaillement ϵ_{xy} mesurés sur la surface d'un composite à renfort jersey en fibres de verre sollicité à 90°

Figure 3.22 – Distribution des champs de déformation longitudinaux, transverses et de cisaillement mesurés sur la surface d'un composite à renfort jersey sollicité à 0° et 90°

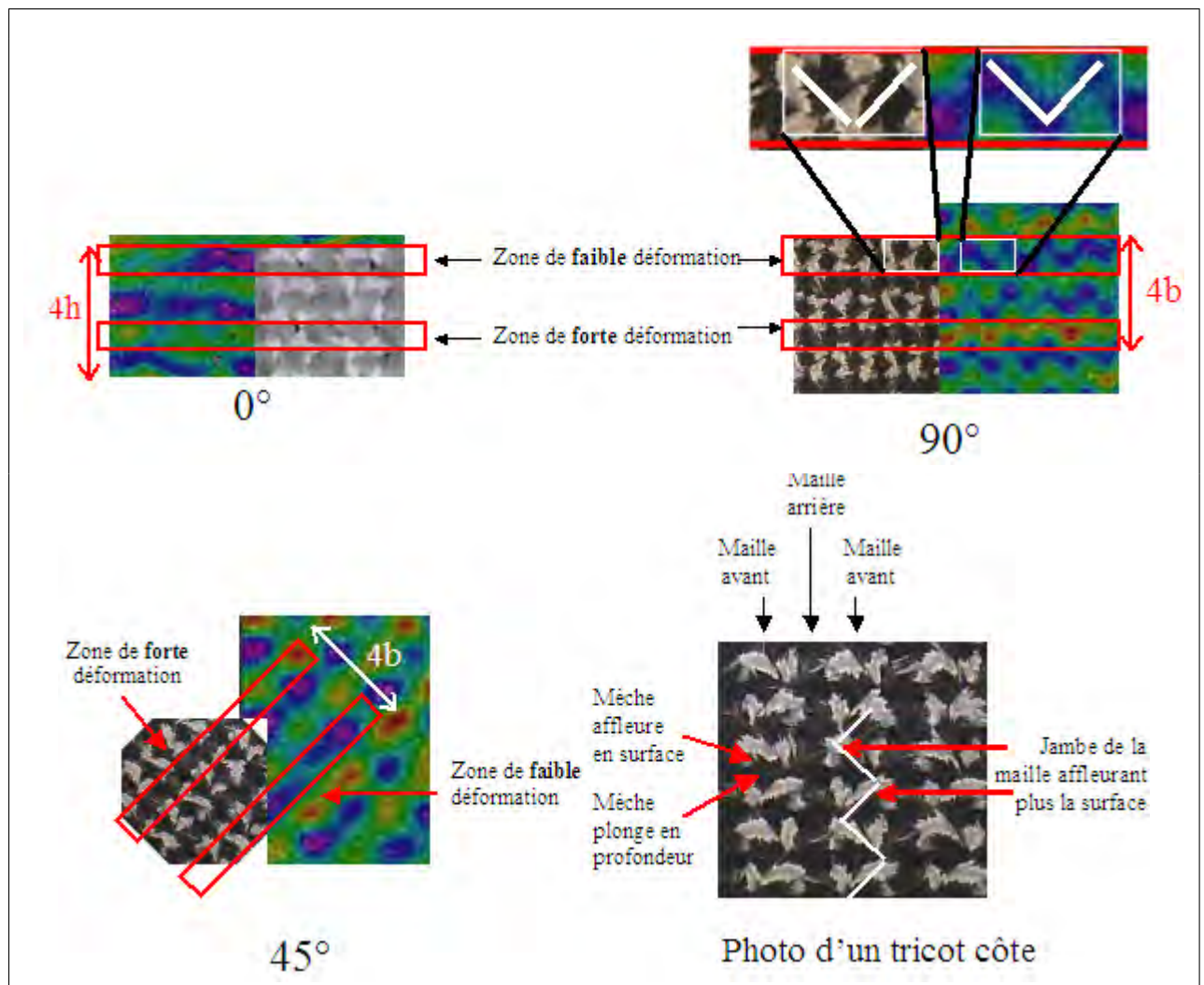


Figure 3.23 – Localisation des zones de faibles et de fortes déformations sur la surface des composites à renfort côte

un motif régulier et discontinu orienté à 45° avec la direction de sollicitation, et plus particulièrement dans la direction colonne du renfort (Figure 3.20). La distance entre deux bandes de faible déformation est de la largeur de deux mailles, tandis qu'elle était de la largeur d'une demi-maille pour les composites renforcés de tricot jersey. Les bandes de faibles déformations sont localisées le long d'une colonne de mailles avant (situées du côté de la surface observée) et les zones de forte déformations sont localisées au niveau d'une colonne de mailles arrières (situées du côté de la surface non observée) (Figure 3.23). La discontinuité observée est due à la structure en relief du tricot côte. En effet, sur une colonne de maille avant, les mèches affleurent à la surface du composite au niveau des jambes des mailles et plongent au cœur du tricot au niveau des têtes des mailles. Le long des bandes de faibles déformations, les niveaux de déformations minimaux sont donc localisés au niveau des jambes des mailles.

Dans le cas d'une sollicitation à 90° , les champs de déformation s'organisent pour dessiner un motif régulier orienté perpendiculairement à la direction de sollicitation. Le motif observé se présente sous forme de bandes en dents de scies (Figure 3.20). La distance entre deux bandes de faibles déformations est de la largeur de deux mailles, tandis qu'elle était de la largeur d'une demi-maille pour les composites renforcés de tricot jersey. Les bandes de faibles déformations sont localisées le long d'une colonne de mailles avant et les zones de forte déformations sont localisées au niveau d'une colonne de mailles arrières (Figure 3.23). La forme en dents de scies est due au fait qu'une jambe de la maille affleure plus à la surface que l'autre et que celle-ci alterne d'une maille à l'autre (Figure 3.23).

3.3.2.3 Conclusion sur les mesures de champs de déformation

La mesure de champs de déformation par stéréo-corrélation d'images numérique a mis en évidence une distribution hétérogène des déformations dans un composite à renfort tricoté sollicité en traction fortement liée à l'architecture du renfort. En effet, les champs de déformations s'organisent et dessinent des motifs spécifiques, généralement périodiques, en fonction des directions de sollicitation et des contextures des renforts et les dimensions des motifs sont de dimensions identiques ou proportionnelles aux dimensions de la maille du tricot.

3.3.3 Observation des faciès de rupture

Les figures 3.24 et 3.25 présentent les photos des éprouvettes rompues des composites à renfort jersey et côte respectivement. La rupture des éprouvettes sollicitées à 0° et 90° a lieu dans un plan perpendiculaire à la direction de sollicitation. Pour une sollicitation à 45° , la rupture des éprouvettes renforcées de jersey a lieu dans un plan orienté à 45° avec la direction de sollicitation et la rupture des composites à renfort côte est également inclinée, cependant la propagation de la fissuration change de direction au cours de l'endommagement. Dans la suite de la section, les modes d'endommagement sont décrits plus précisément en fonction de la contexture du renfort et de la direction de sollicitation. Pour une même contexture et une même direction de sollicitation la rupture se produit au même endroit du matériau quelle que soit la nature de la fibre.

3.3.3.1 Endommagement des composites à renfort jersey

La rupture des composites renforcés de fibres de verre et de basalte est progressive et diffuse en comparaison avec celle des composites renforcés de fibres de carbone, notamment

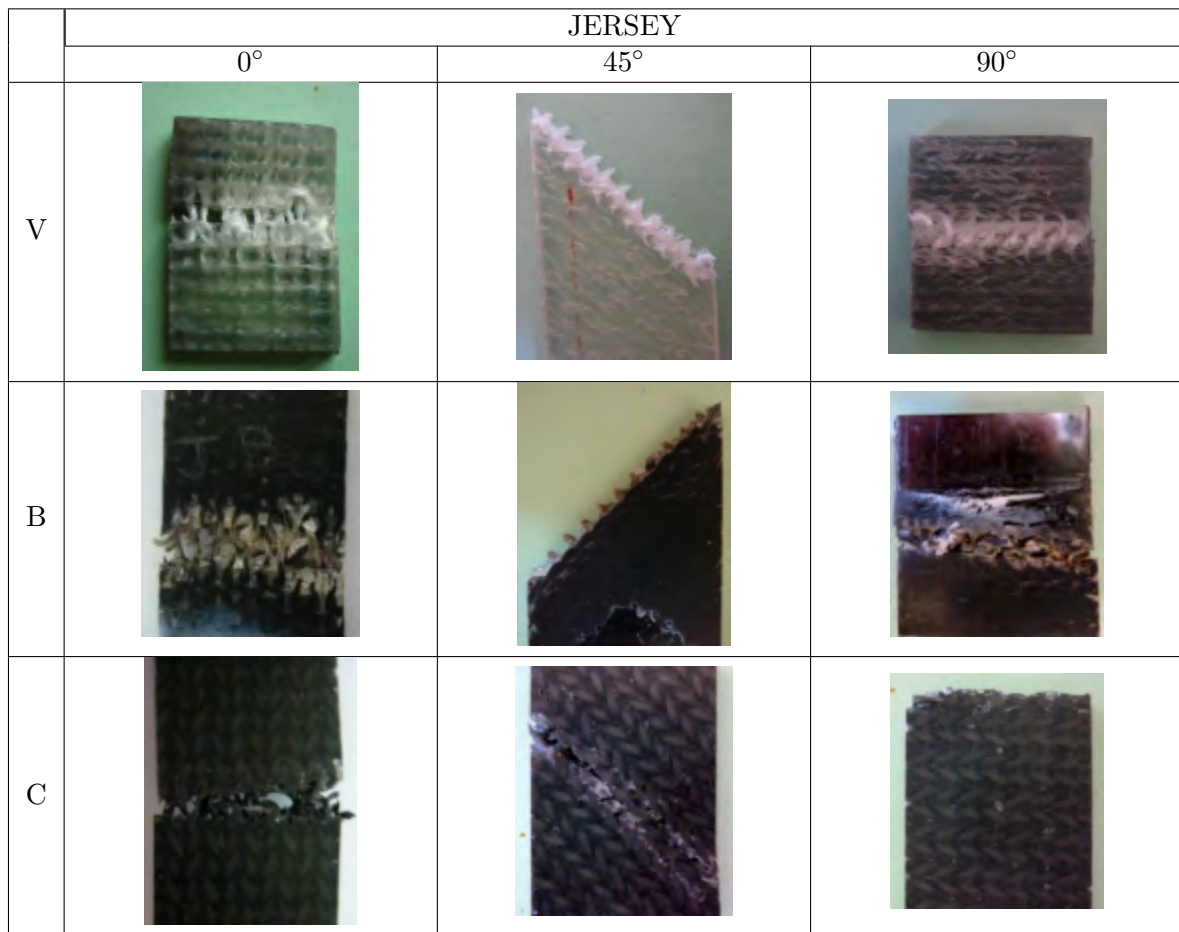


Figure 3.24 – Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort jersey

à 0°. Cette observation est en accord avec les courbes de contrainte-déformation décrivant le comportement des composites renforcés de fibres de carbone comme étant proche d'un matériau élastique fragile (Figure 3.13). Un faciès de rupture similaire est observé à 45° et 90°, ce qui est cohérent avec les propriétés déterminées à partir des essais de traction et avec les champs de déformation observés par stéréo-corrélation.

3.3.3.1.1 Endommagement des composites à renfort jersey sollicités à 0° : La figure 3.26 présente des images prises à la loupe binoculaire et au MEB environnemental (MEBE) des éprouvettes rompues de composites à renfort jersey sollicités à 0°. Dans une zone proche de la zone de rupture, des fissures sont apparentes à la surface des éprouvettes et se présentent sous forme de créneaux (Figure 3.26.b). La forme de ces créneaux se retrouve dans la zone de rupture (Figure 3.26.c). La figure 3.26.d représente une vue de dessus du faciès de rupture. Sur cette image sont observées des empreintes de fibres qui correspondent à l'empreinte d'une mèche de la tête d'une maille. Une mèche de fibres ainsi qu'un trou correspondant au déchaussement d'une mèches sont également visibles. Elles correspondent aux jambes des mailles. Ces observations mettent en évidence que l'endommagement est initié par un décollement des mèches de fibres de la matrice. Les fissures se propagent à l'interface






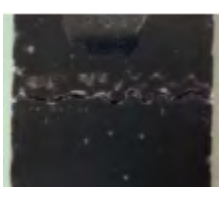
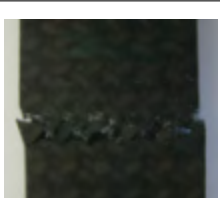
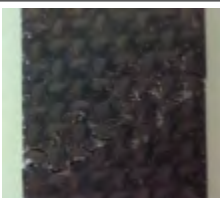

	CÔTE		
	0°	45°	90°
V			
B			
C			

Figure 3.25 – Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort côte

des zones riches et pauvres en fibres (Figure 3.26.e). La fissure se propage le long des mailles adjacentes d'une même rangée et la rupture de la matrice a lieu lorsque la fissure traverse la largeur de l'éprouvette. Les deux parties du composite sont alors reliées par les fibres au niveau des jambes des mailles qui sont alors sollicitées. La rupture totale de l'éprouvette a lieu par rupture transverse des mèches de fibres au niveau des jambes des mailles.

3.3.3.1.2 Endommagement des composites à renfort jersey sollicités à 45° et à 90° : Le mode d'endommagement des composites à renfort jersey sollicités à 45° et 90° est similaire. La figure 3.27 présente des images prises à la loupe binoculaire et au MEBE des faciès de rupture des composites sollicités à 45° et 90°.

Les images de loupe binoculaire prises sur les composites renforcés de fibres de carbone permettent de bien distinguer le renfort. Dans les deux directions, la rupture a lieu le long d'une colonne de mailles. Des fissures sont apparentes à l'interface des zones riches et pauvres en fibres. Sur un agrandissement MEBE du faciès de rupture d'un composite renforcé de fibres de basalte sollicité à 45° prise de dessus des mèches de fibres ainsi que des empreintes de mèches sont visibles ; elles correspondent aux jambes des mailles se trouvant respectivement de part et d'autre du plan de rupture. L'image MEBE du composite renforcé de fibres de verre sollicité à 90° montre que la rupture suit parfaitement les jambes des mailles. Les fissures s'amorcent par un décollement mèches de fibres/matrice et se propagent à l'interface des zones riches et pauvres en fibres. La rupture a lieu lorsque les fissures se sont entièrement propagées le long de la colonne de la maille, traversant l'éprouvette et les mèches de fibres se rompent au niveau des tête des mailles.

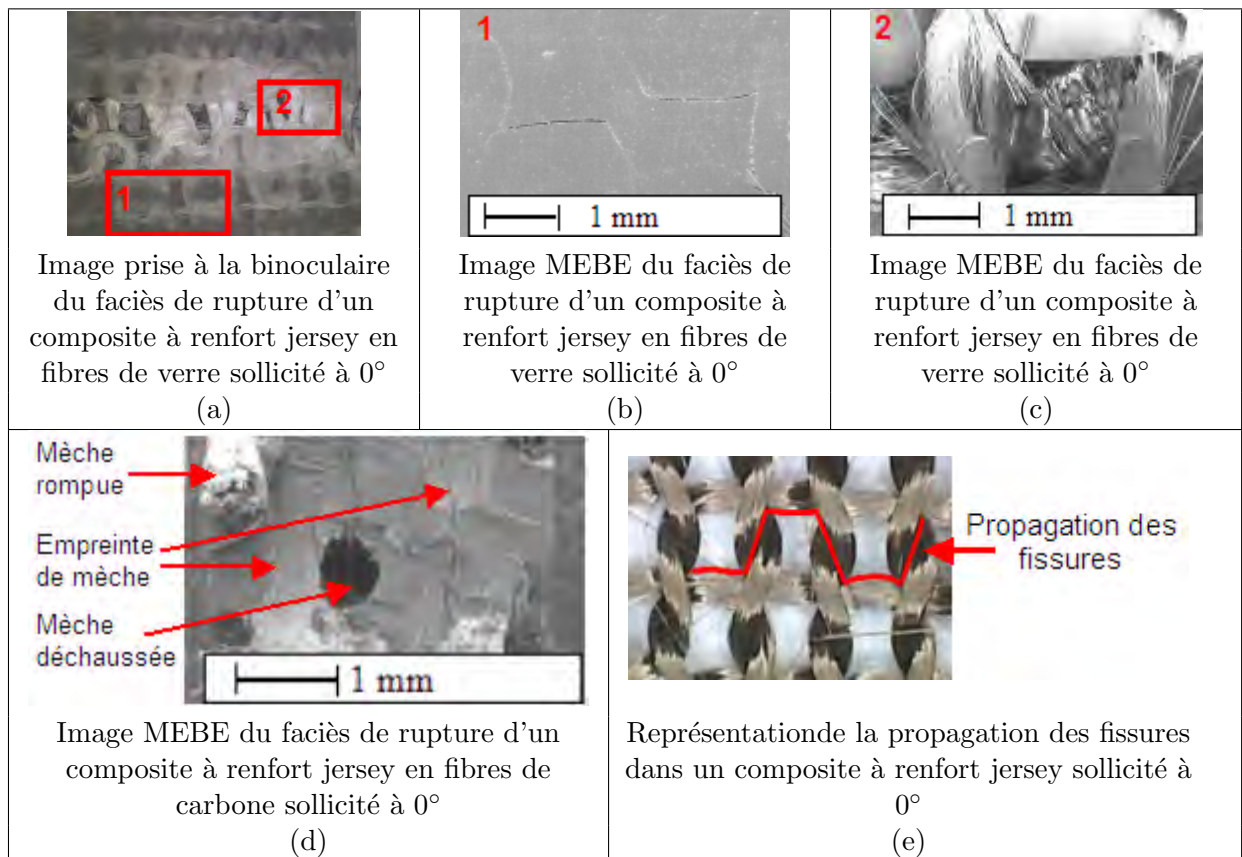


Figure 3.26 – Endommagement des composites à renfort jersey sollicités dans la direction 0°

3.3.3.2 Endommagement des composites à renfort côte

Les composites sollicités à 0° et 90° présentent un plan de rupture orienté perpendiculairement à la direction de sollicitation (Figure 3.25). Les composites sollicités à 45° présentent quand à eux une rupture dont l'angle d'inclinaison se modifie lors de la propagation. Pour une même direction de sollicitation, le mode d'endommagement des composites à renfort côte est identique, quelle que soit la nature de la fibre.

3.3.3.2.1 Endommagement des composites à renfort côte sollicités à 0° : Des images prises à la loupe binoculaire sont présentées dans la figure 3.28.a. Le plan de rupture est situé entre deux rangées de mailles et l'endommagement des éprouvettes est localisé dans des zones proches de la rupture, et plus particulièrement dans les rangées de mailles adjacentes au plan de rupture. Le mode d'endommagement des éprouvettes est représenté sur la figure 3.28.b. Des fissures apparaissent par cisaillement au niveau des interfaces entre les mèches de fibres et la matrice, le long d'une jambe de chaque maille de la rangée (1). Les fissures se propagent entre deux rangées de mailles, d'une colonne à l'autre (2). La rupture se produit entre deux rangées de mailles (3) et entraîne ensuite un déplacement des deux parties de l'éprouvette à 45° (4).

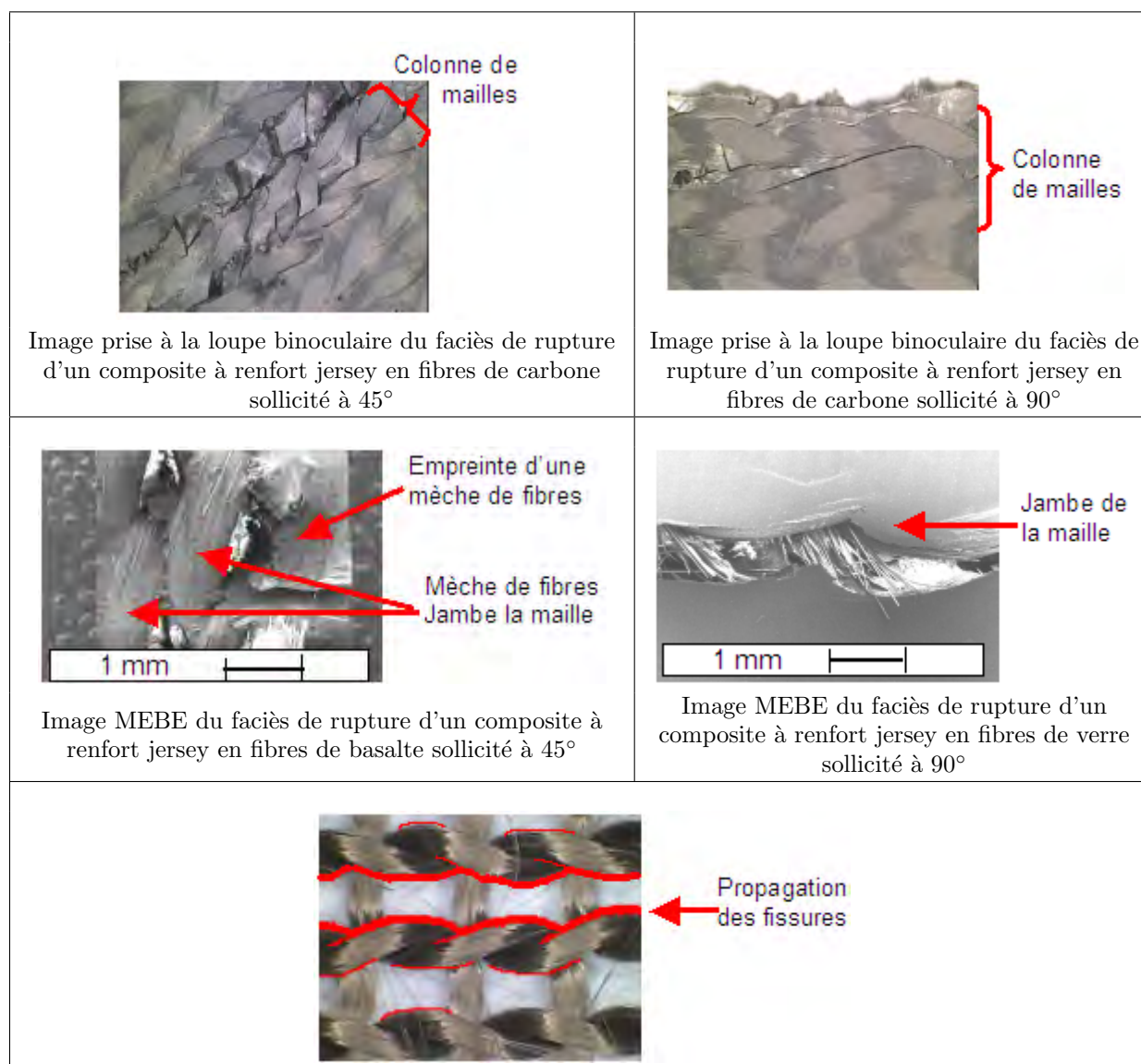


Figure 3.27 – Endommagement des composites à renfort jersey sollicités dans la direction 45° et 90°

3.3.3.2.2 Endommagement des composites à renfort côte sollicités à 45° : La figure 3.29 présente les images des éprouvettes à renfort côte sollicitées à 45°. La rupture est orientée d'un angle d'environ 45° avec la direction de sollicitation. Les fissures apparaissent à l'interface entre les zones riches et pauvres en fibres le long des jambes des mailles et se propagent dans les zones riches en résine d'une colonne de mailles avant à une autre. La rupture est discontinue. Les fissures se propagent d'une part du rangée de mailles à une autre et d'autre part d'une colonne à une autre.

3.3.3.2.3 Endommagement des composites à renfort côte sollicités à 90° : La figure 3.30 présente l'endommagement des composites à renfort côte sollicités à 90°. L'endom-

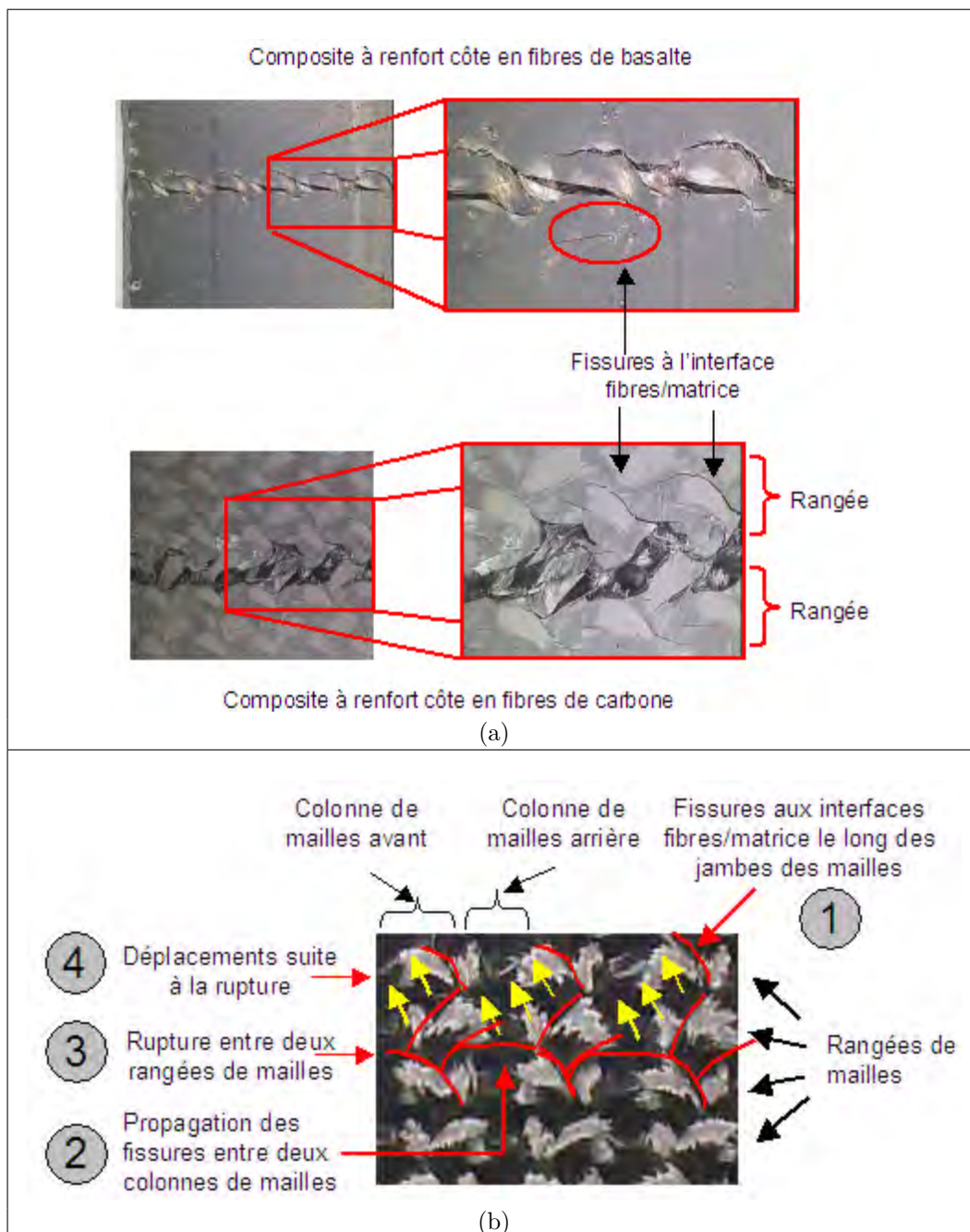


Figure 3.28 – Endommagement des composites à renfort côtelé sollicités dans la direction 0°

l'endommagement est localisé dans la zone de rupture. Les fissures apparaissent également à l'interface entre les zones riches et pauvres en fibres le long des jambes des mailles. Les fissures suivent le côté des jambes internes de la maille et se propagent d'une rangée à l'autre en passant de la jambe gauche à la jambe droite de la maille. Le faciès de rupture dessine un motif ondulé rappelant le motif des champs de déformations observé avec la stéréocorrélation d'images (Figure 3.23).

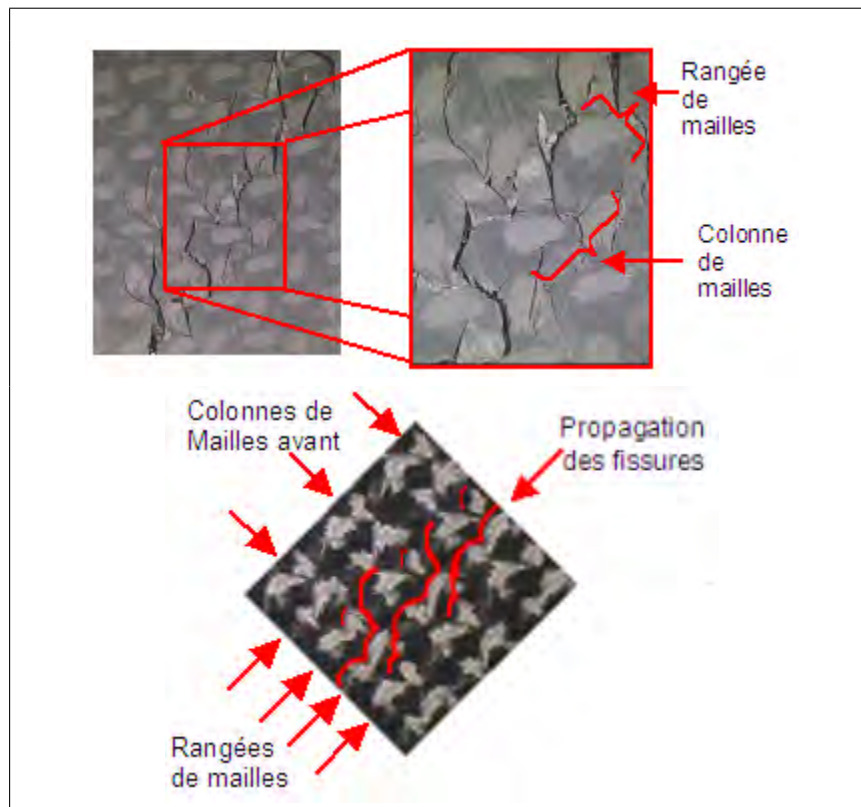


Figure 3.29 – Endommagement des composites à renfort côtelé sollicités dans la direction 45°

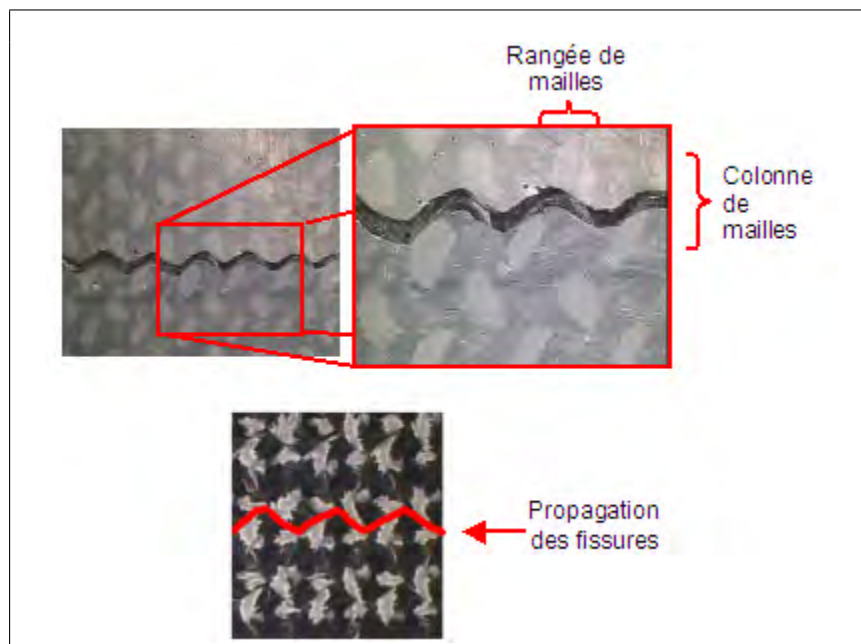


Figure 3.30 – Endommagement des composites à renfort côtelé sollicités dans la direction 90°

3.3.3.3 Conclusion sur les observations des faciès de rupture des composites

Les observations des faciès de rupture de l'ensemble des composites renforcés de contextures simples montrent que l'endommagement est lié à la contexture et à la direction de sollicitation. Les composites à renfort jersey s'endommagent le long des rangées de mailles dans le cas d'une sollicitation à 0° et le long d'une colonne de mailles dans le cas de sollicitations à 45° et 90° . Le mode d'endommagement est similaire lors des sollicitations à 45° et 90° , ce qui est cohérent avec l'anisotropie observée dans les courbes de comportement avec des propriétés plus élevées à 0° et proches à 45° et 90° . Concernant les composites renforcés de tricot côte, les plans de rupture sont spécifiques aux directions de sollicitation, cependant dans tous les cas, des fissures apparaissent aux interfaces entre les zones riches et pauvres en résine au niveau des jambes des mailles, ce qui peut expliquer le caractère quasi-isotrope du composite à renfort côte.

3.3.4 Conclusion sur le comportement des composites à renfort tricoté simple

L'étude du comportement des composites à renforts tricotés de contextures simples a mis en évidence les différences de comportement entre un composite à renfort jersey et un composite à renfort côte. Le premier présente un comportement fortement anisotrope avec des propriétés plus importantes à 0° et des propriétés proches à 45° et 90° et le second présente un comportement quasi-isotrope avec des propriétés proches dans les trois directions de sollicitation. Les meilleures propriétés sont obtenues avec un composite à renfort jersey dans la direction 0° . La nature de la fibre a une influence plus ou moins prononcée sur le comportement du composite selon la direction de sollicitation et la nature du renfort. Les composites renforcés de fibres de carbone atteignent les meilleures propriétés. La mesure de champs de déformations par stéréo-corrélation d'images ainsi que l'observation des faciès de rupture mettent en évidence le fait que le comportement du matériau au cours de l'essai de traction est fortement lié à l'architecture du renfort. Dans la suite du chapitre, l'influence de l'insertion de mèches non tricotées dans la largeur du renfort jersey sur le comportement et les propriétés du composite est étudiée.

3.4 Influence des fils flottés sur le comportement du composite

Cette section est consacrée à l'étude du comportement des composites à renfort jersey-chargé et plus particulièrement à l'influence de l'insertion du nombre de fils flottés dans la rangée du tricot jersey sur le comportement et les propriétés du composite. L'étude est consacrée dans un premier temps à l'analyse des courbes de comportement obtenues à partir des essais de traction et des propriétés qui en découlent. Par la suite, l'évolution et la distribution des champs de déformation mesurés par stéréo-corrélation d'images numériques ainsi que l'endommagement des éprouvettes par observation des faciès de rupture seront étudiés. Comme précisé à la section 3.1.3 les composites renforcés de jersey comportent trois plis de renfort et les composites renforcés de tricots jersey-chargé comportent deux plis de renfort. Un taux de fibres équivalent est obtenu avec les composites à renfort jersey et JC1 et des taux de fibres plus élevés sont atteints avec les renforts JC2 et JC3 (Tableau 3.5).

3.4.1 Analyse des résultats

Chaque essai a été réalisé trois fois afin de vérifier la répétabilité des résultats. L'ensemble des courbes est donné en annexe G. Une courbe représentative de chaque essai a été choisi pour la discussion et est représentée sur la figure 3.31. Chacun des graphiques de cette figure présente les courbes de comportement des composites à renfort Jersey et *JC* en fonction de la contexture du renfort pour une direction de sollicitation et une nature de fibre données. Le tableau 3.7 donne les propriétés mécaniques et les écart-types calculés à partir des courbes de comportement selon les méthodes présentées à la section 3.2.2. La présence des fils flottés dans la rangée du tricot ainsi que le nombre de mèches insérées ont un impact variable sur le comportement des composites selon la direction de sollicitation. L'étude porte dans un premier temps sur l'impact des mèches flottées sur les propriétés du matériaux, dans un deuxième temps, sur l'influence de la nature de la fibre sur les propriétés du matériau et dans un troisième temps sur l'impact des mèches flottées sur le degré d'anisotropie du composite. Pour mettre en évidence l'impact de ces paramètres sur les propriétés mécaniques, les modules élastiques et les contraintes à la rupture sont représentés sous forme d'histogrammes.

Nature de fibre		Verre			
Contexture		J	JC1	JC2	JC3
0°	$E_L(0^\circ)$ [Gpa]	11,2 ± 0,1	9,8 ± 0,3	10,8 ± 0,2	12,1 ± 0,2
	$\nu_{12}(0^\circ)$	0,35	0,28	0,22	0,31
	R_m [MPa]	112,2 ± 4,8	90,7 ± 3,2	102,8 ± 2,4	82,4 ± 0,5
45°	$E_L(45^\circ)$ [Gpa]	8,1 ± 0,2	9,0 ± 0,4	11,3 ± 0,3	13,3 ± 0,4
	$\nu_{12}(45^\circ)$	0,44	-	0,59	0,31
	R_m [MPa]	54,1 ± 2,2	66,4 ± 0,2	86,7 ± 2,1	87,3 ± 2,7
90°	$E_L(90^\circ)$ [Gpa]	8,2 ± 0,0	8,8 ± 0,2	12,2 ± 0,2	17,2 ± 0,6
	$\nu_{12}(90^\circ)$	0,27	0,29	0,31	0,31
	R_m [MPa]	42,3 ± 3,4	57,1 ± 3,0	124,1 ± 5,1	164,2 ± 1,2
Nature de fibre		Basalte			
Contexture		J	JC1	JC2	JC3
0°	$E_L(0^\circ)$ [Gpa]	12,8 ± 0,1	9,7 ± 0,4	10,8 ± 0,2	11,8 ± 0,3
	$\nu_{12}(0^\circ)$	0,24	0,28	0,35	0,24
	R_m [MPa]	136,9 ± 5,4	84,2 ± 9,2	97,1 ± 3,7	87,9 ± 4,6
45°	$E_L(45^\circ)$ [Gpa]	8,5 ± 0,1	8,3 ± 0,3	10,8 ± 0,2	13,5 ± 0,1
	$\nu_{12}(45^\circ)$	0,53	0,29	0,29	0,23
	R_m [MPa]	54,8 ± 0,9	47,7 ± 1,0	85,8 ± 4,5	95,8 ± 6,0
90°	$E_L(90^\circ)$ [Gpa]	9,3 ± 0,8	9,0 ± 0,2	12,0 ± 0,8	16,4 ± 0,8
	$\nu_{12}(90^\circ)$	0,21	0,24	0,26	0,24
	R_m [MPa]	51,1 ± 0,3	52,5 ± 2,6	130,0 ± 6,6	160,9 ± 5,4
Nature de fibre		Carbone			
Contexture		J	JC1	JC2	JC3
0°	$E_L(0^\circ)$ [Gpa]	17,5 ± 0,7	12,7 ± 0,1	13,7 ± 0,7	12,7 ± 0,8
	$\nu_{12}(0^\circ)$	0,58	0,25	0,26	0,26
	R_m [MPa]	152,1 ± 0,2	107,9 ± 15	121,5 ± 4,6	104,9 ± 3,0
45°	$E_L(45^\circ)$ [Gpa]	8,9 ± 0,0	8,8 ± 0,2	15,0 ± 0,8	18,2 ± 1,0
	$\nu_{12}(45^\circ)$	0,49	0,74	0,35	0,29
	R_m [MPa]	55,6 ± 3,2	46,0 ± 0,7	106,6 ± 6,8	130,2 ± 5,2
90°	$E_L(90^\circ)$ [Gpa]	9,3 ± 0,7	10,6 ± 1,3	19,2 ± 1,4	21,8 ± 0,2
	$\nu_{12}(90^\circ)$	0,57	0,41	0,52	0,40
	R_m [MPa]	63,3 ± 3,6	75,2 ± 7,6	163,4 ± 6,3	197,4 ± 0,0

Tableau 3.7 – Propriétés mécaniques des composites à renforts *JC*

3.4. Influence des fils flottés sur le comportement du composite

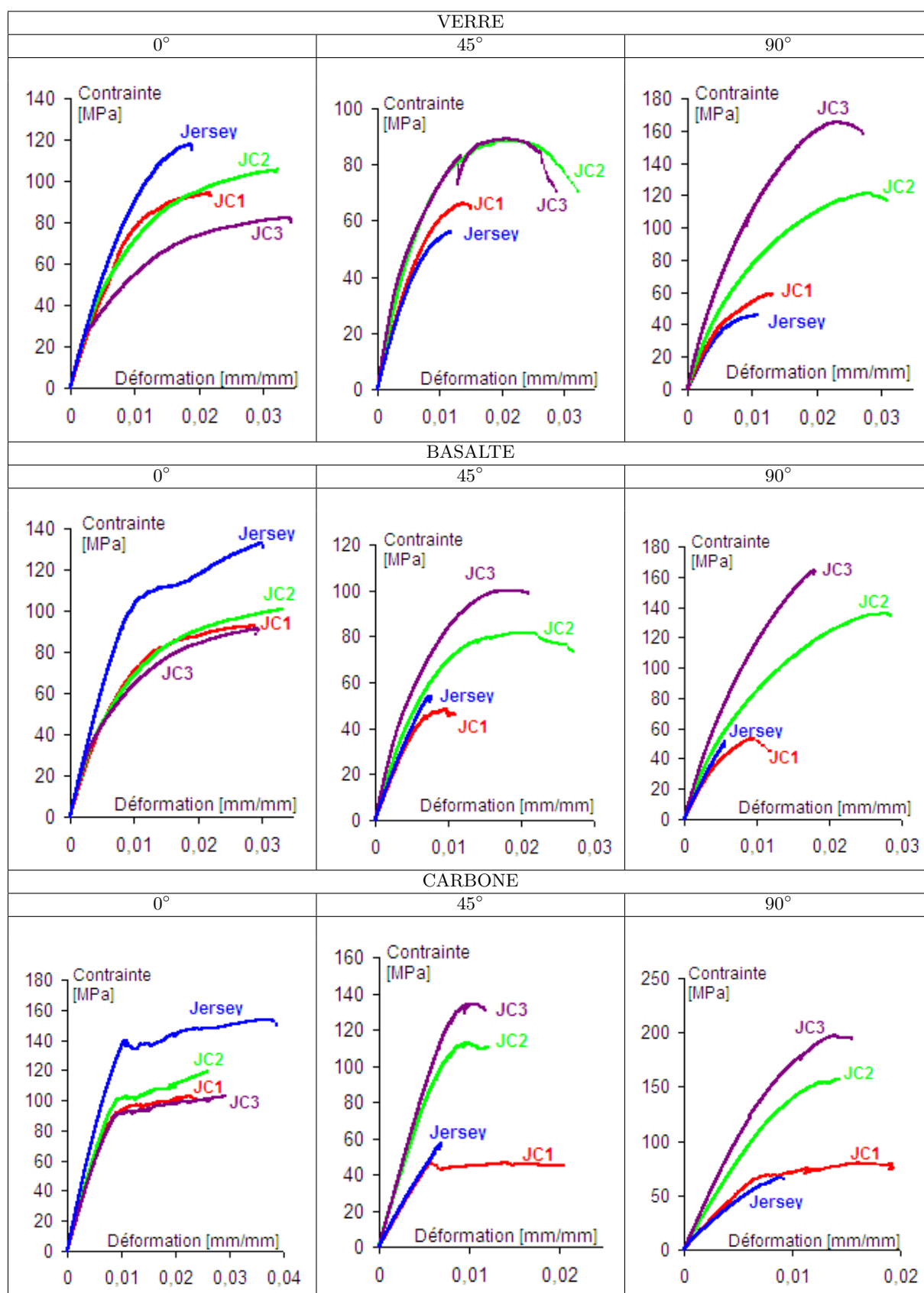


Figure 3.31 – Courbes de contrainte-déformation des composites renforcés de textiles tricotés de contexture JC

3.4.1.1 Influence de la contexture sur les propriétés mécaniques des composites

Sur la figure 3.32 sont représentés les histogrammes donnant les modules élastiques et les contraintes à rupture des matériaux en fonction de la contexture. De manière générale, les propriétés obtenues sont réduites dans la direction 0° et augmentées dans les directions 45° et 90° lorsque des mèches sont insérées dans la rangée du renfort. Les propriétés mécaniques des composites sont fortement liées à la distribution des fibres dans le renfort ainsi qu'au taux de fibres. Les composites à renfort Jersey et JC1 comportent respectivement trois et deux plis de renfort. Ils présentent des taux de fibres équivalents mais la distribution des fibres est différente. Les composites à renfort JC1, JC2 et JC3 comportent le même nombre de couches de renfort. Leur taux de fibres et la distribution des fibres sont différentes.

3.4.1.2 Influence de la contexture sur les propriétés mécaniques des composites sollicités à 0°

Quelle que soit la nature de la fibre, le module élastique et la contrainte à rupture sont plus faibles avec un renfort JC1 qu'avec un renfort jersey. La diminution des propriétés est liée à la différence dans la distribution des fibres dans le composite puisque les taux de fibres sont équivalents. Les mèches flottées, bien qu'elles ne soient pas tendues dans le tricot, sont préférentiellement orientées à 90° . De ce fait, avec un taux de fibres équivalent, la proportion de fibres orientées à 0° est plus faible avec un renfort JC1 qu'un renfort Jersey, ce qui explique partiellement la diminution des propriétés et notamment du module élastique. D'autre part, l'étude du comportement des composites renforcés de tricots simples a mis en évidence un endommagement des matériaux s'amorçant et se propageant à l'interface des zones riches et pauvres en fibres et majoritairement dans la direction transverse. Le flotté, orienté préférentiellement à 90° , engendre une augmentation de ces zones fragiles, ce qui a pour conséquence une diminution des propriétés mécaniques et notamment de la résistance du matériau. L'augmentation du nombre de flottés par rangée de tricot entraîne une augmentation des taux de fibres et également une variation de la distribution des fibres dans le composite. En augmentant le nombre de flottés par rangée, le module élastique augmente légèrement, sauf dans le cas du composite à renfort JC3 en fibres de carbone. Dans ce dernier cas, la diminution du module élastique n'est pas significative puisque les valeurs obtenues sont proches et les écart-types observés avec les renforts JC2 et JC3 sont relativement importants (respectivement $13,7 \pm 0,67$ et $12,7 \pm 0,75$). Les contraintes à la rupture atteintes augmentent puis diminuent en passant de 2 à 3 flottés par rangée de tricot. L'augmentation du taux de fibres, qui semble dans un premier temps avoir un effet positif sur le comportement du matériau, est dans un deuxième temps néfaste. Les composites à renfort JC en fibres de basalte et de carbone ont un comportement proche quel que soit le nombre de flottés insérés (Figure 3.31). Le comportement des composites à renfort *JC* en fibres de carbone est similaire à celui des composites à renfort jersey : il s'agit d'un comportement de type élastique fragile jusqu'à rupture de la matrice. Dans le cas d'un renforcement en fibres de basalte, le comportement du composite à renfort JC est fortement endommageable avec une perte rapide de la linéarité de la courbe. Dans le cas d'un renforcement en fibres de verre, le domaine endommageable du comportement des composites est plus important avec les renforts *JC* et particulièrement avec un renfort JC3. La présence des fils flottés dans la largeur du composite amène une augmentation des zones fragiles, à l'interface fibre/matrice, et donc de l'endommagement, ce qui a pour effet de réduire la résistance du matériau.

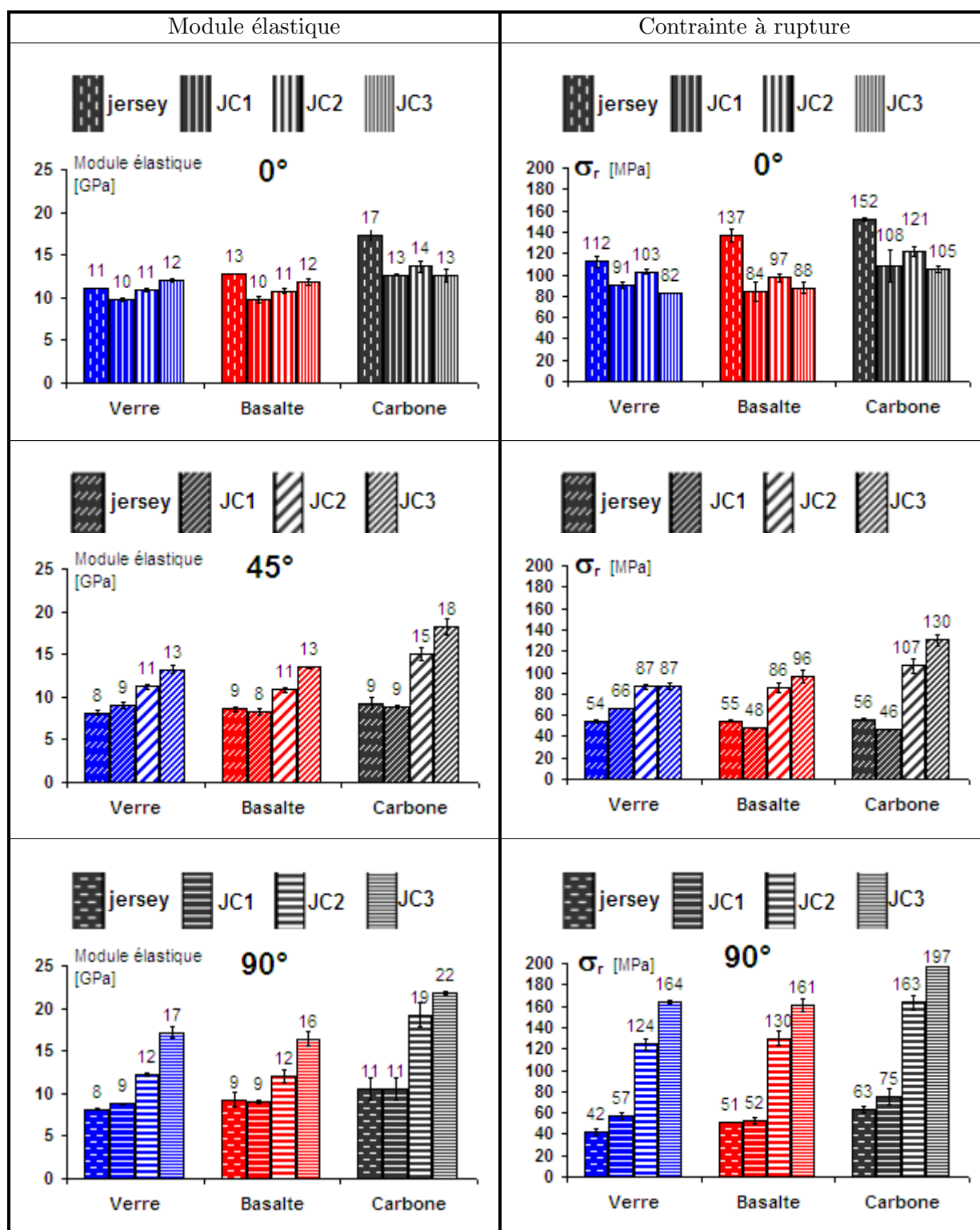


Figure 3.32 – Histogrammes des modules élastiques et des contraintes à la rupture des composites à renfort JC en fonction de la contexture

3.4.1.3 Influence de la texture sur les propriétés mécaniques des composites sollicités à 45°

Lorsque le composite est sollicité à 45° , une augmentation des propriétés est observée (Figure 3.32). Les composites à renfort jersey et *JC1*, dont les taux de fibres sont équivalents, présentent un module élastique équivalent quelle que soit la nature de la fibre avec toutefois une résistance plus élevée avec un renfort en verre et plus faible avec un renfort en basalte ou carbone. L'augmentation du nombre de flottés par rangée entraîne une augmentation du module élastique et de la résistance du composite, quelle que soit la nature de la fibre. Seul le composite renforcé de fibres de verre présente une contrainte à la rupture équivalente avec un renfort *JC2* et *JC3*. Les courbes de comportement (Figure 3.31) montrent que les composites renforcés de fibres de verre ont un comportement élastique endommageable avec une augmentation de l'endommagement en relation avec la présence de flottés dans le renfort et plus particulièrement avec les renforts *JC2* et *JC3*. Les composites renforcés de fibres de basalte dont le comportement était proche d'un matériau élastique fragile avec un renfort jersey, présentent un endommagement plus important avec les renforts *JC* qui entraîne dans un premier temps une diminution de la résistance pour le composite *JC1*. Le comportement des composites renforcés de fibres de basalte est proche d'un comportement élastique fragile avec un renfort jersey et *JC1*. Une augmentation du nombre de flottés dans le renfort et du taux de fibres entraîne une amélioration significative des propriétés et conduisent à un comportement endommageable plus marqué.

3.4.1.4 Influence de la texture sur les propriétés mécaniques des composites sollicités à 90°

Les propriétés mécaniques des composites sollicités à 90° augmentent avec la présence de flottés dans le renfort (Figure 3.32). Renforcés de jersey et de *JC1*, les modules élastiques obtenus sont équivalents tandis que les contraintes à rupture atteintes sont plus élevées avec la présence d'un flotté par rangée de tricot. À taux de fibres équivalent, l'impact du fil flotté n'est pas significatif. Une importante augmentation des propriétés est cependant observée avec les textures *JC2* et *JC3*. L'augmentation des taux de fibres dans le composite entraîne une augmentation de la proportion de fibres orientées dans une direction proche de la direction de sollicitation, ce qui a pour conséquence l'amélioration des propriétés mécaniques des composites. Les courbes de comportement (Figure 3.31) montrent que le domaine endommageable des composites renforcés de tricots *JC* est très marqué, ce qui n'est pas le cas avec un renfort jersey en fibres de carbone et de basalte. L'augmentation du nombre de flottés par rangée de tricot entraîne un endommagement diffus qui amène à d'importantes déformations à rupture.

3.4.1.5 Influence de la nature de la fibre sur le comportement des composites à renforts *JC*

La figure 3.33 présente les histogrammes donnant les modules élastiques et les contraintes à rupture en fonction de la nature de la fibre des composites à renforts *JC*. Dans la majorité des cas, les composites renforcés de fibres de carbone atteignent les meilleures performances ; ceci est vérifié à 0° et 90° . Dans le cas d'une sollicitation à 0° , l'influence de la nature de la fibre semble diminuer avec l'augmentation du nombre de flottés par rangée de renfort, notamment pour le module élastique. En effet, les modules des composites renforcés de fibres de verre et de basalte sont proches et l'écart entre les modules obtenus avec les différentes

natures de fibres diminue. Dans le cas d'une sollicitation à 45° et 90° , la nature de la fibre a peu d'influence sur les propriétés du composite à renfort jersey. La nature de la fibre a une influence qui augmente avec le nombre de flottés par rangée de tricot, les taux de fibres dans le composite et donc la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation. Les propriétés des composites renforcés de fibres de verre et de basalte restent proches, cependant celles des composites renforcés de fibres de carbone sont supérieures. Le même phénomène est observé avec une sollicitation à 90° . L'augmentation de la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation entraîne donc une augmentation de l'influence de la nature de la fibre sur les propriétés des composites et plus particulièrement sur les modules élastiques. Les composites renforcés de fibres de verre et de basalte, dont le module d'Young de la fibre est proche (respectivement 80 GPa et 84 GPa), tendent vers des propriétés élastiques proches en augmentant les proportions de fibres orientées dans la direction de sollicitation. L'écart entre les modules élastiques des composites renforcés de fibres de carbone (dont le module d'Young est de 238 GPa) et ceux renforcés de fibres de verre ou de basalte croît avec l'augmentation de la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation.

3.4.1.6 Impact des fils flottés sur l'anisotropie des composites

La figure 3.34 donne les histogrammes des modules élastiques et des contraintes à rupture en fonction de la direction de sollicitation. Renforcés d'un tricot jersey, les propriétés des composites sont plus élevées dans la direction 0° et sont proches dans les directions 45° et 90° . Cette tendance s'inverse en insérant des mèches non tricotées dans la rangée du tricot. Les propriétés des composites renforcés de JC1 sont plus élevées à 0° (comme dans le cas du jersey), cependant l'écart entre les valeurs obtenues dans les trois directions diminuent. Avec des renfort JC2 et JC3, les propriétés atteintes sont plus importantes dans la direction 90° et dépassent même dans certains cas les propriétés des composites à renfort jersey sollicités à 0° , tandis que les propriétés obtenues à 0° sont fortement affectées. Les composites renforcés de JC1 et de JC2 en fibres de verre et de basalte atteignent des modules élastiques proches. Ils présentent un comportement quasi-isotrope élastique. Le nombre de mèches insérées par rangée peut être choisi en fonction du degré d'anisotropie désiré, cependant, l'obtention d'un matériau isotrope induit une perte des propriétés mécaniques dans une direction.

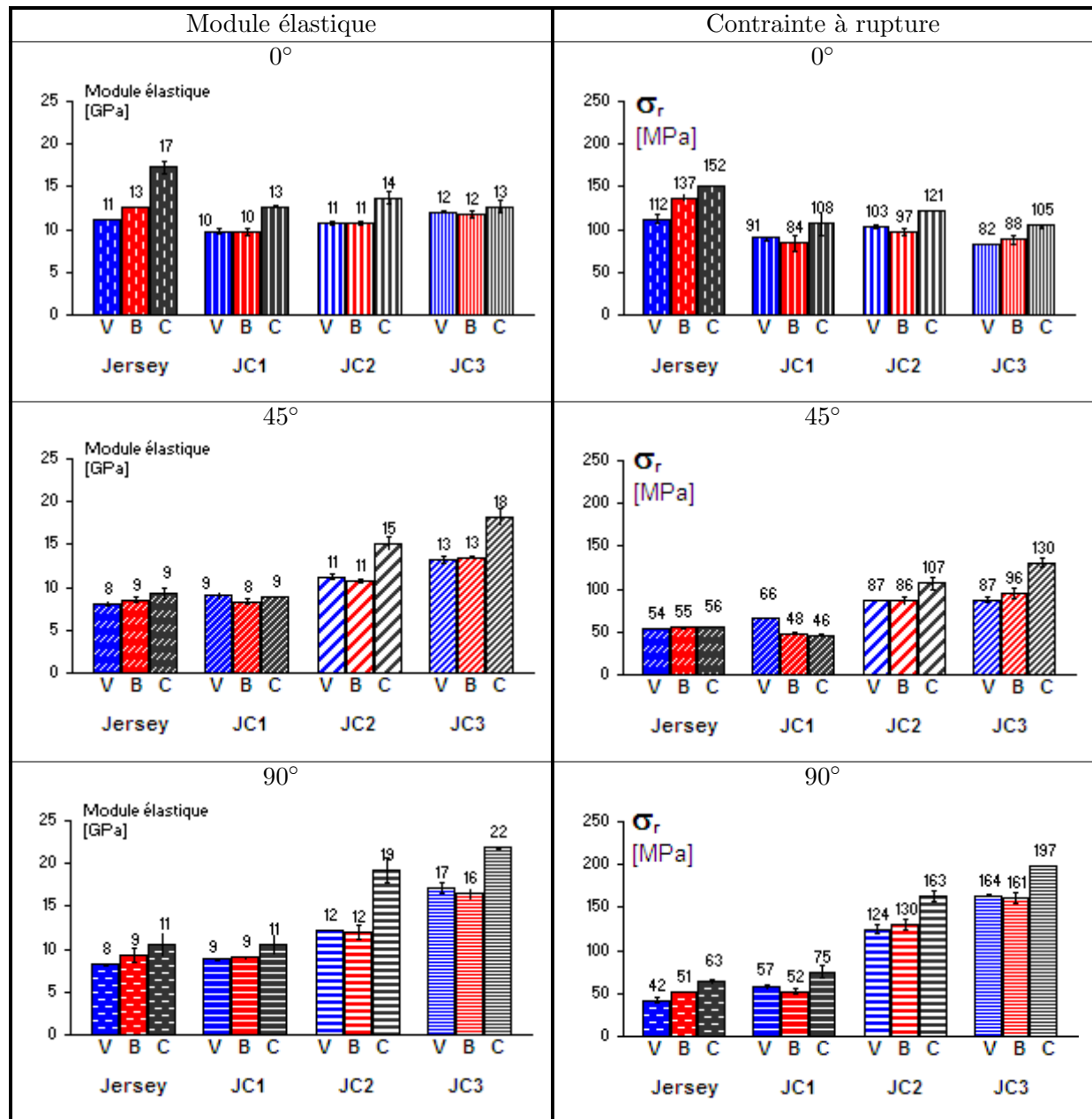


Figure 3.33 – Histogrammes des modules élastiques et des contraintes à la rupture des composites à renfort JC en fonction de la nature de la fibre

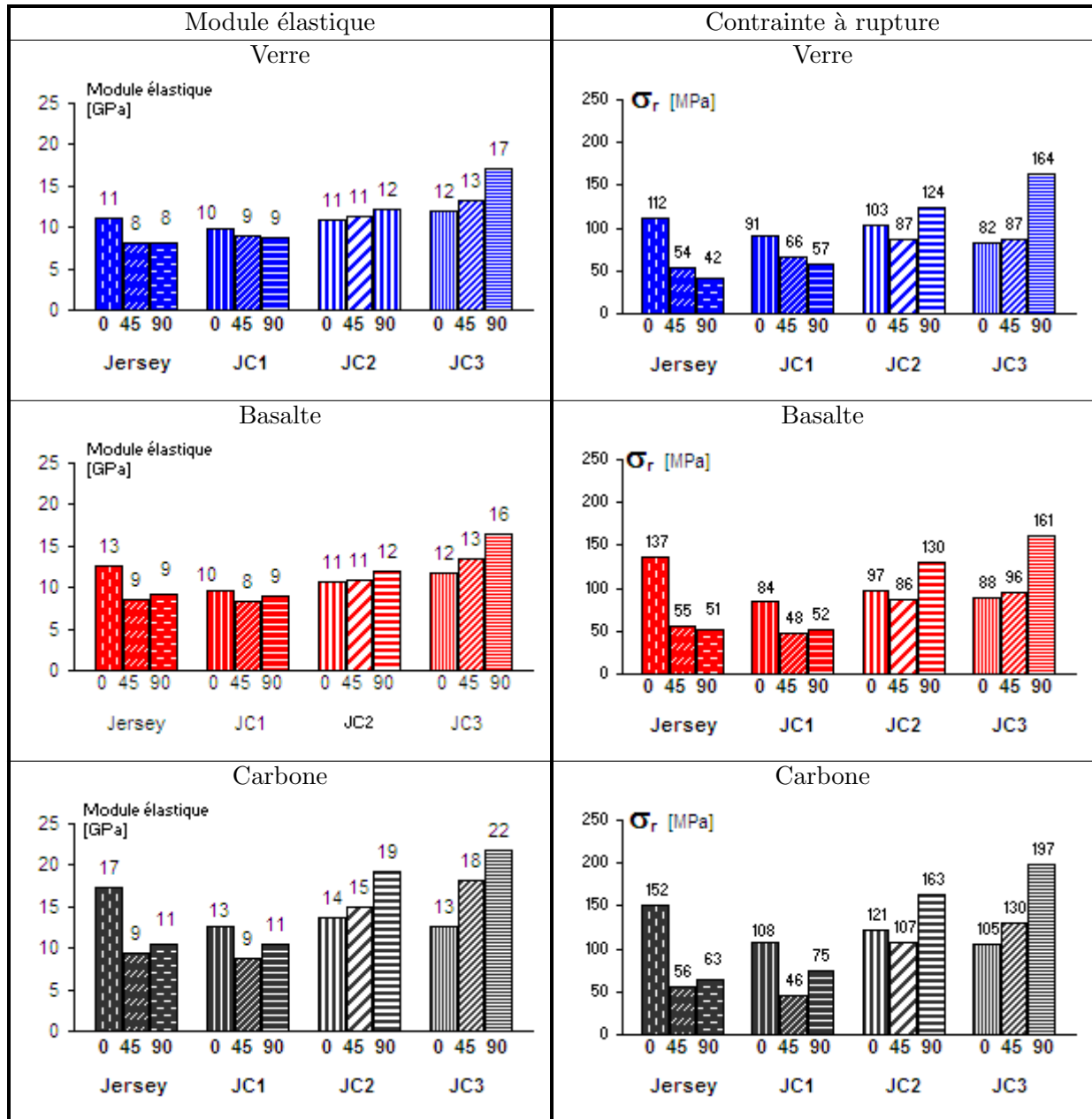


Figure 3.34 – Histogrammes des modules élastiques et des contraintes à la rupture des composites à renfort JC en fonction de la direction de sollicitation

3.4.2 Mesures des champs de déformation par stéréo corrélation d'images numériques

La figure 3.35 donne les évolutions des champs de déformation mesurés lors des essais de traction à 0° , 45° et 90° sur les composites à renfort JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre, de basalte ou de carbone. Pour chaque type d'essai, la première image donne le champ de déformation dans le domaine élastique du comportement, la seconde image, dans le domaine endommageable du comportement et la dernière image, donne le champ de déformation juste avant rupture du matériau. Dans tous les cas, un champ de déformation hétérogène, dessinant un motif spécifique à la direction de sollicitation, est observé à la surface des éprouvettes. Celui-ci est orienté dans la direction transversale dans le cas d'une sollicitation à 0° et 90° et orienté d'un angle de 45° avec la direction du chargement dans le cas d'une sollicitation à 45° . Les dimensions des motifs varient selon les contextures et les directions de sollicitation. Dans la suite de l'étude, la distribution des champs de déformation dans le domaine endommageable du comportement est étudiée pour une contexture donnée en fonction des directions de sollicitation et des natures de fibres.

3.4.2.1 Distribution des champs de déformation pour un composite à renfort JC1

La figure 3.36 représente la distribution des champs de déformation mesurés dans le domaine endommageable des composites à renfort JC1 en fibres de verre, de basalte et de carbone, sollicités à 0° , 45° et 90° . Un rectangle de la dimension de la cellule élémentaire du renfort est représenté sur chacune des images. La cellule élémentaire comprend quatre colonnes et une rangée de tricot (Figure 4.35.a). Les champs de déformation étant mesurés sur la surface des éprouvettes, la connaissance de la position des renforts dans le composite est importante. Elle est telle que la face observée sur la figure 4.35.a correspond à la surface du composite. Lors d'une sollicitation à 0° , les champs de déformation des composites à renfort JC1 dessinent un motif orienté perpendiculairement à la direction de sollicitation. Les dimensions entre deux bandes sont de la hauteur d'une rangée de mailles. Lors d'une sollicitation à 45° , les champs de déformation dessinent un motif orienté à 45° avec la direction de sollicitation et plus particulièrement orienté dans la direction colonne du renfort. Le motif se répète toutes les quatre colonnes de mailles, ce qui correspond à la largeur de la cellule unitaire. Chaque CER est composée d'une maille chargée suivie de trois mailles libres qui se retrouvent représentées sur le motif par une bande de faible déformation (colonne de mailles chargées) et par une bande plus large de fortes déformations (3 colonnes de mailles libres). Les champs de déformation observés sur la surface des éprouvettes sollicitées à 90° sont orientées transversalement, c'est à dire dans la direction colonne du renfort. Avec un renfort en fibres de basalte, le motif observé est similaire à celui à 45° avec une hauteur égale à la largeur de la cellule unitaire et l'alternance d'une bande fine de faibles déformations et d'une bande large de fortes déformations. Avec des renforts en fibres de verre et de carbone, le motif n'est pas aussi marqué, cependant une répétition de la dimension d'une cellule unitaire est également apparente. Une fine bande de fortes déformations est observée toutes les largeurs de CER sur les composites renforcés de fibres de verre et une alternance de bandes de faibles et fortes déformations apparaît sur les surfaces des composites renforcés de fibres de carbone.

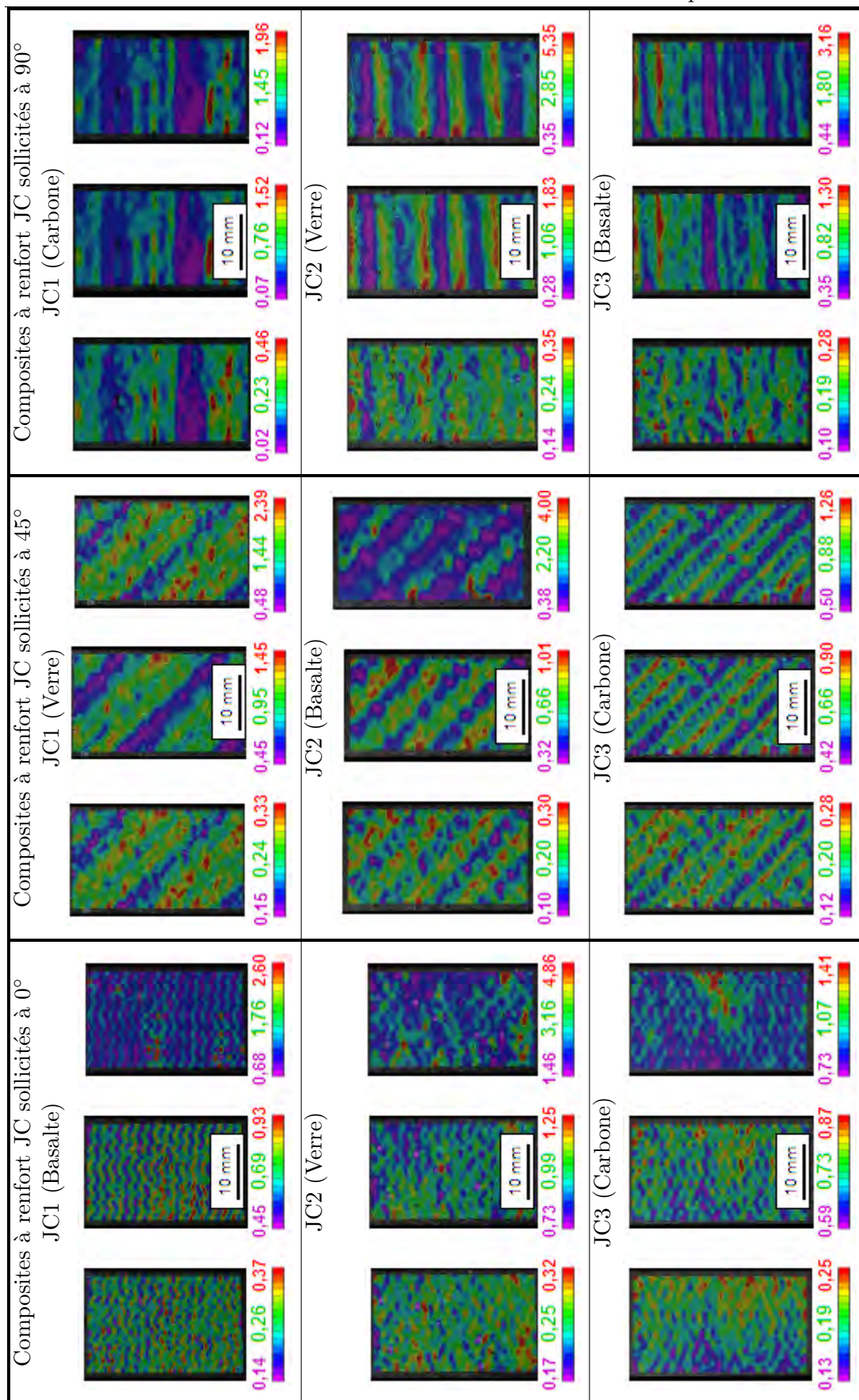


Figure 3.35 – Suivi des champs de déformation au cours d'un essai de traction sur un composite à renfort JC

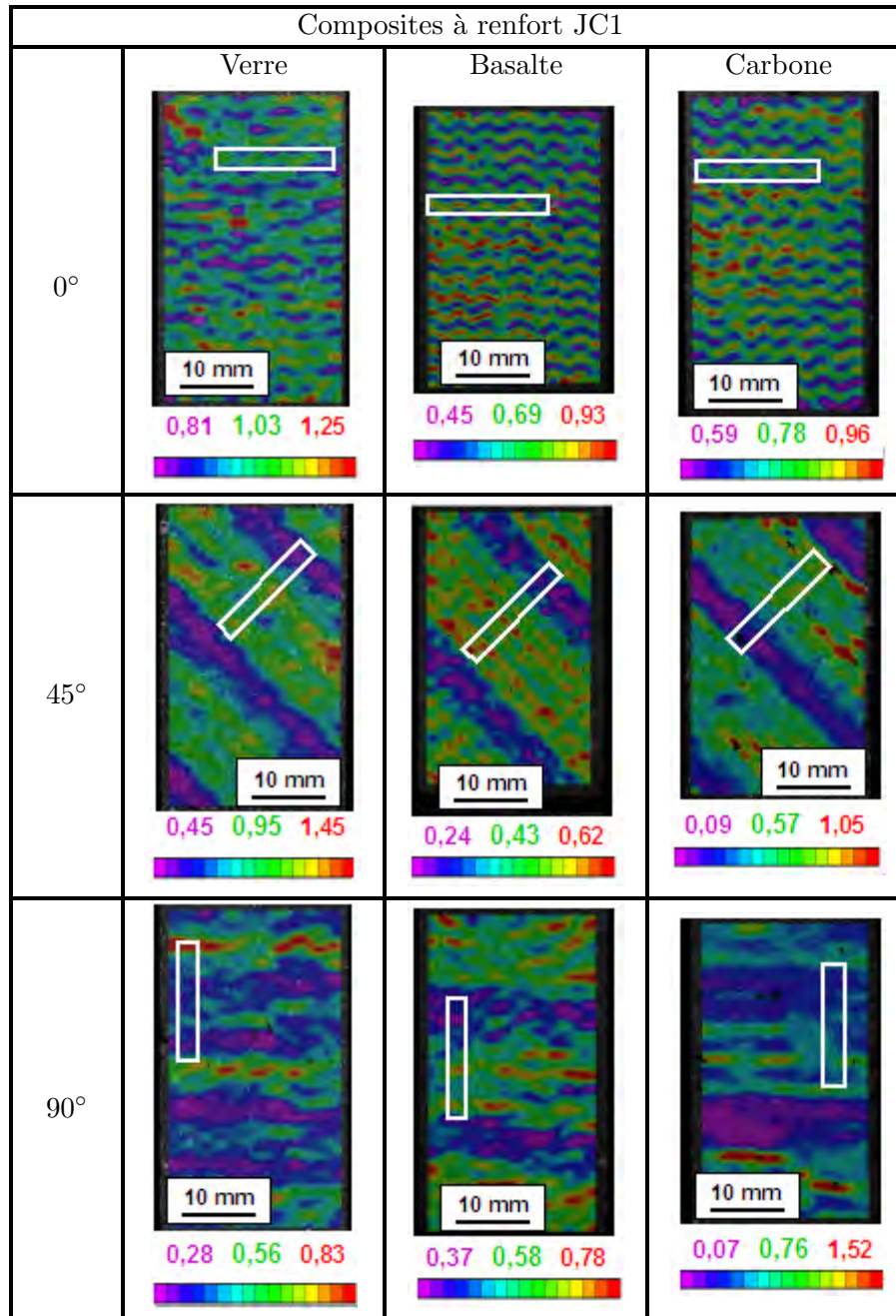


Figure 3.36 – Champs de déformation des composites à renfort JC1

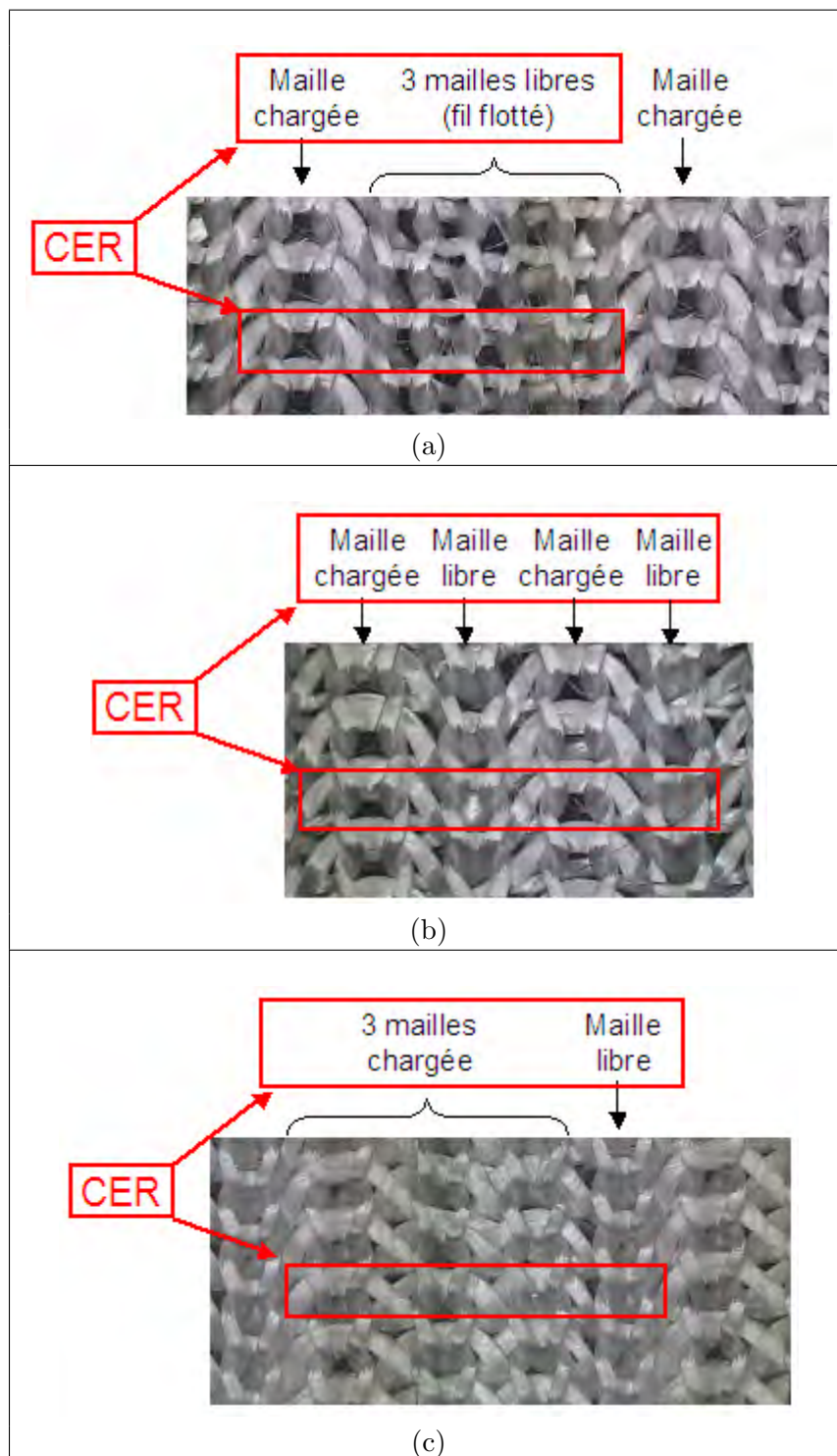


Figure 3.37 – Photo des tricots (a) JC1, (b) JC2 et (c) JC3 et représentation de la CER

3.4.2.2 Distribution des champs de déformation pour un composite à renfort JC2

La figure 3.38 représente la distribution des champs de déformations dans le domaine endommageable des composite à renfort JC2 en fibres de verre, de basalte et de carbone, sollicités à 0° , 45° et 90° . Un rectangle de la dimension de la cellule élémentaire du renfort est représenté sur chacune des images. La cellule élémentaire comprend quatre colonnes et une rangée de tricot (Figure 4.35.b). Chaque CER est composée d'une alternance d'une maille chargée et d'une maille libre. La face observée sur la figure 4.35.b correspond à la surface du composite. Dans le cas d'une sollicitation à 0° , la distribution des champs de déformation est hétérogène. Le motif observé est composé de zones de faibles et fortes déformations très localisées s'orientant préférentiellement dans la direction transverse de l'éprouvette. La hauteur du motif est de la dimension d'une rangée de mailles. Les champs de déformation observés à 45° s'organisent pour dessiner des bandes inclinées orientées dans la direction colonne du renfort. Le motif répété est de la dimension d'une demi largeur de la cellule unitaire et il alterne une bande de fortes déformations et une bande de faibles déformations. Ce motif est cohérent avec l'architecture du renfort alternant une colonne de mailles chargées et une colonne de mailles libres. Dans le cas des composites sollicités à 90° , les motifs observés sont également orientés dans la direction colonne du renfort. Avec un renfort en fibres de verre et de carbone, une alternance de bandes de faibles et de fortes déformations de la largeur d'une colonne de mailles est observée, comme lors de la sollicitation à 45° . Avec un renfort en fibres de basalte, les champs de déformation sont également orientés dans la direction transverse de l'éprouvette. Le motif est discontinu et des zones de fortes et de faibles déformations localisées sont observées, cependant l'alternance des colonnes de mailles chargées et libres n'est plus visible.

3.4.2.3 Distribution des champs de déformation pour un composite à renfort JC3

La figure 3.39 représente la distribution des champs de déformation des composites à renfort JC3 en fibres de verre, de basalte et de carbone, sollicités à 0° , 45° et 90° et obtenus pour un niveau de déformation du domaine endommageable du comportement. Un rectangle de la dimension de la cellule élémentaire du renfort est représenté sur chacune des images. La cellule élémentaire comprend quatre colonnes et une rangée de tricot (Figure 4.35.c). Chaque CER est composée de trois mailles chargées par une mèche de flotté différente et d'une maille libre. La distribution des déformations sur la surface des composites sollicités à 0° est hétérogène. Les champs de déformation s'orientent préférentiellement dans la direction rangée du renfort, cependant les motifs formant des bandes observés avec les composites à renfort Jersey et JC1 ne sont pas visibles. Des zones très localisées de faibles et fortes déformations apparaissent. Lors des sollicitations à 45° et 90° , les champs de déformations sont également orientés dans la direction colonne des tricots. Les composites renforcés de fibres de carbone et sollicités à 45° présentent un motif périodique sur lequel une alternance de fines bandes de faibles et de fortes déformations s'alternent et la distance entre deux lignes de même niveau de déformation est de la largeur d'une colonne de mailles. Les composites renforcés de fibres de verre et de basalte sollicités à 45° et les composites sollicités à 90° , ont une distribution des champs de déformation orientés dans la direction colonne du composite, cependant, les dimensions de la cellule élémentaire ne sont plus visibles.

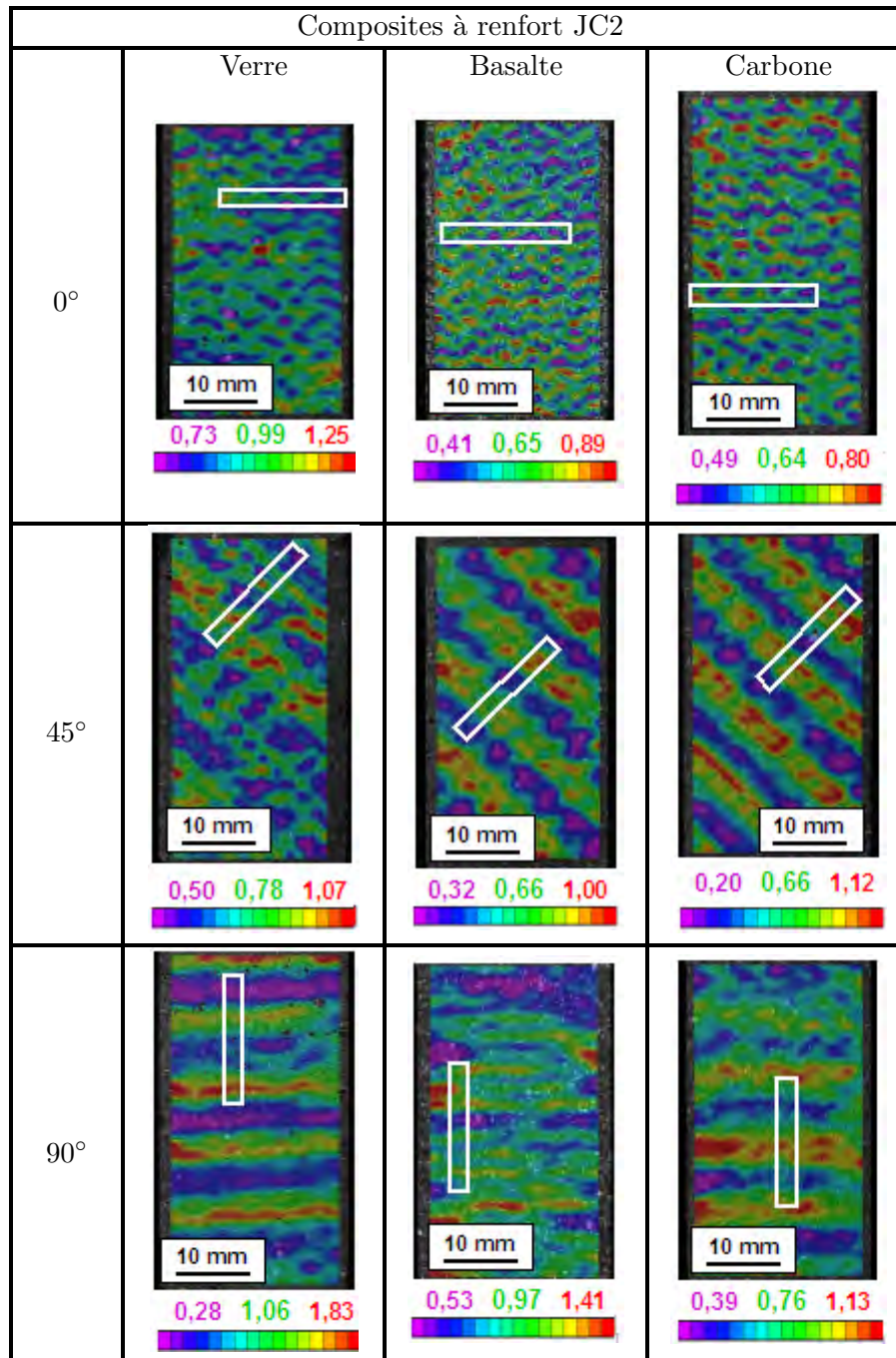


Figure 3.38 – Champs de déformation des composites à renfort JC2

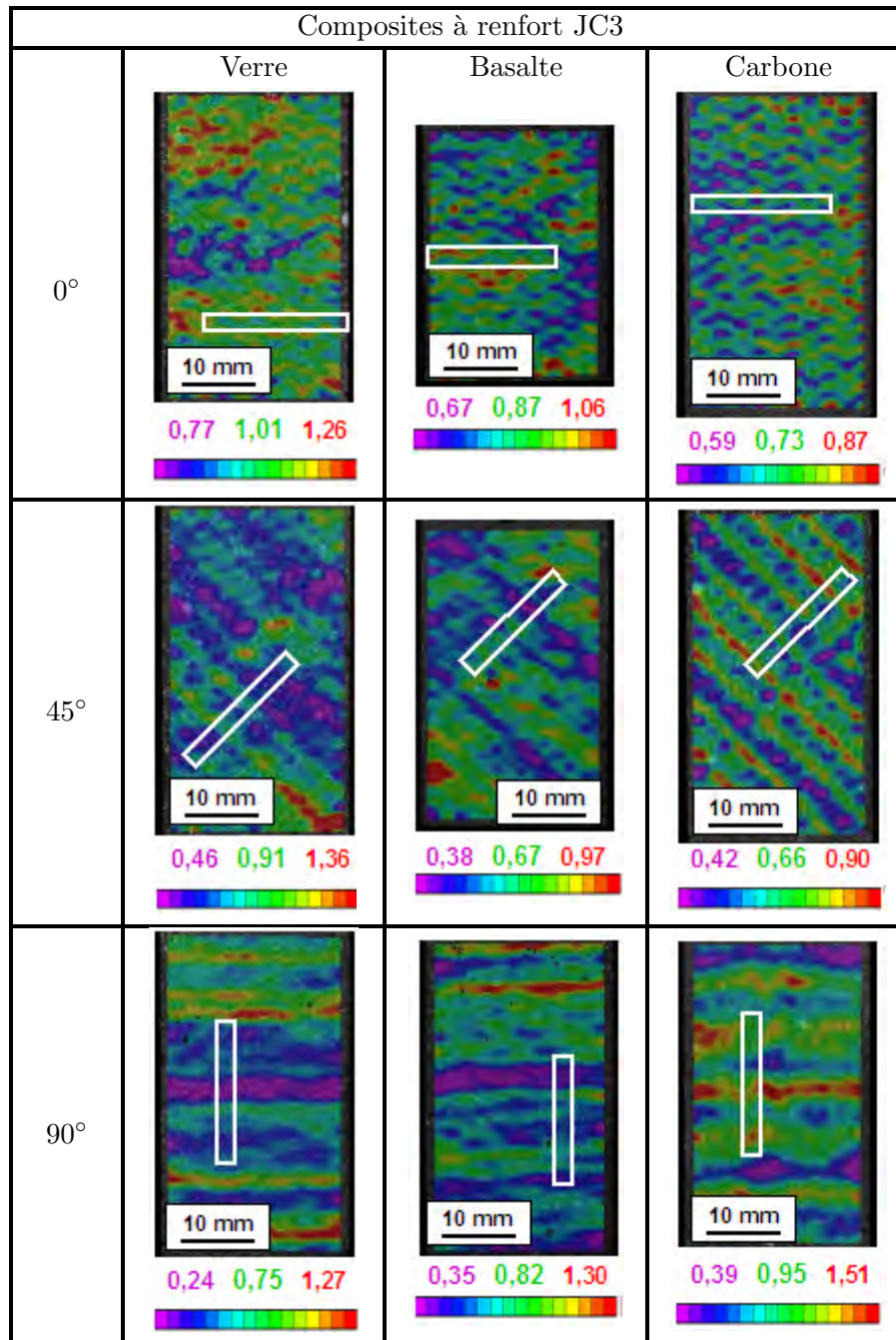


Figure 3.39 – Champs de déformation des composites à renfort JC3

3.4.2.4 Conclusion sur les mesures de champs de déformation

La mesure de champs de déformation par stéréo-corrélation d'images numériques a mis en évidence une distribution hétérogène des déformations dessinant des motifs spécifiques selon la texture et la direction de sollicitation. Quel que soit le renfort JC, les champs de déformation des composites sollicités à 0° dessinent des motifs orientés dans la direction rangée du renfort et les champs de déformation des matériaux sollicités à 45° et 90° , dessinent des motifs orientés dans la direction colonne des renforts. Les dimensions des motifs observés sont souvent de la taille des CER de la texture du tricot et permettent de localiser les zones de faibles et de fortes déformations dans les différentes zones du renfort.

3.4.3 Endommagement des composites à renfort JC

3.4.3.1 Endommagement des composites à renfort JC1

La figure 3.40 présente les photos des éprouvettes rompues des composites renforcés de JC1.

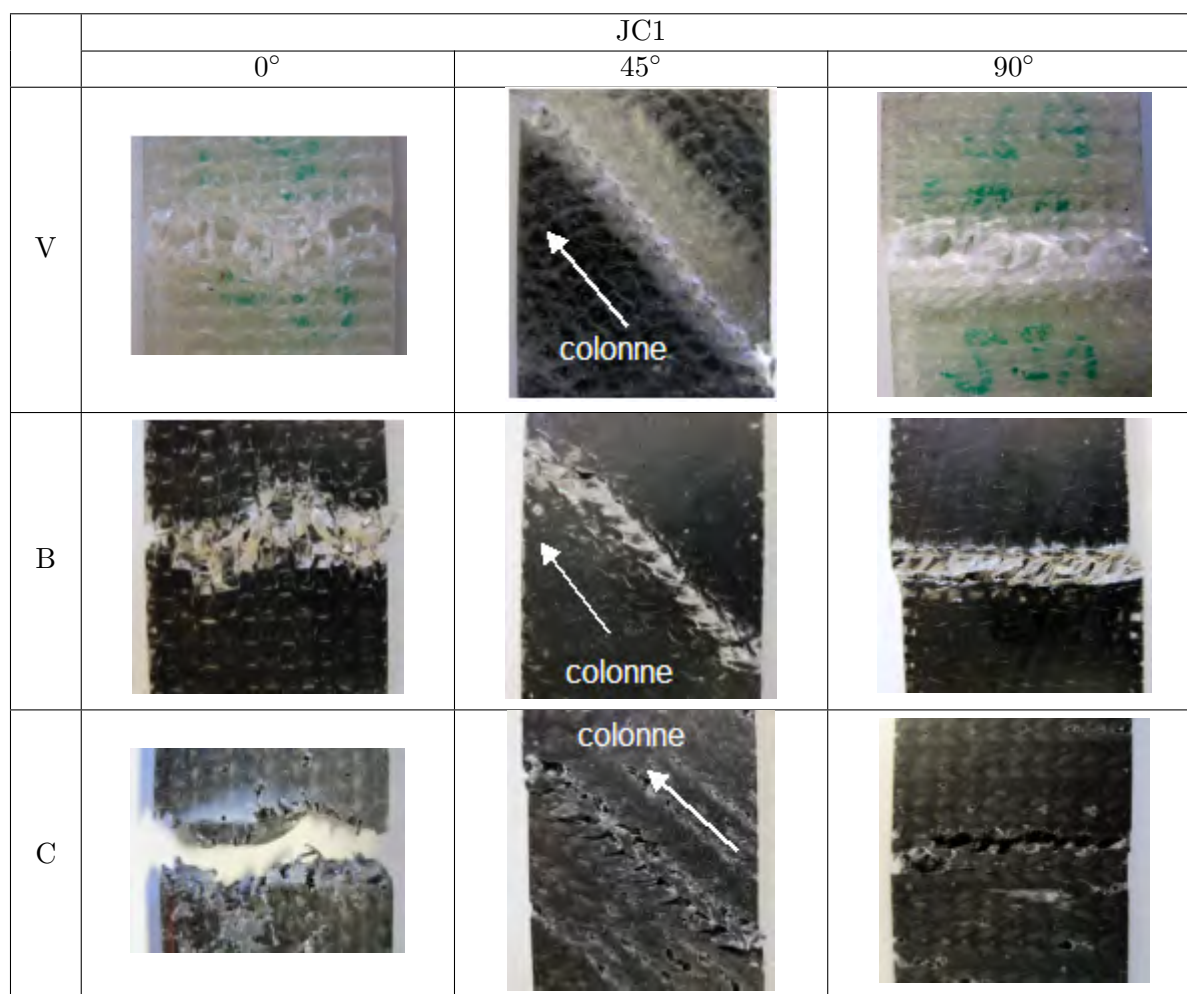


Figure 3.40 – Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort JC1

La rupture des composites à renfort JC1 a lieu dans la direction transversale de l'éprouvette lorsqu'ils sont sollicités à 0° et 90° et dans un plan de rupture orienté à 45° lorsqu'ils sont sollicités à 45° . Pour une même direction de sollicitation, l'endommagement des composites est similaire quelle que soit la nature de la fibre. La figure 3.41 présente des photos des renforts JC1 sur lesquelles sont localisées les ruptures.

Lors d'une sollicitation à 0° , l'endommagement est localisé dans la zone de rupture. Celle-ci n'est pas tout à fait perpendiculaire à la direction de sollicitation mais prend une forme d'ondulation. Les fissures apparaissent aux interfaces des zones riches et pauvres en fibres et se propagent le long des mèches de fibres, en l'occurrence, le long d'une mèche flottée (fil flotté 1 sur la figure 3.41.a). A la rencontre de la colonne de mailles chargée, la fissure suit la charge de la mèche flottée du rang inférieur (fil flotté 2). La rupture de la matrice a lieu lorsque la fissure traverse la largeur de l'éprouvette. La rupture finale de l'éprouvette se produit par rupture des fibres au niveau des jambes des mailles. L'endommagement des éprouvettes sollicitées à 45° et 90° est similaire. Les fissures apparaissent le long des jambes des mailles aux interfaces entre les zones riches et pauvres en fibres et se propagent le long d'une colonne de mailles. La rupture se produit entre la colonne de mailles chargée et la colonne de mailles libres adjacente.

3.4.3.2 Endommagement des composites à renfort JC2

La figure 3.42 présente les photos des éprouvettes rompues des composites renforcés JC2. La rupture des composites à renfort JC2 a lieu dans la direction transversale de l'éprouvette lorsqu'ils sont sollicités à 0° et 90° . Dans le cas d'une sollicitation à 45° , l'endommagement se produit soit dans la direction colonne, soit dans la direction rangée du renfort. La figure 3.43 présente des photos des renforts JC2 sur lesquelles sont localisées les ruptures.

Dans le cas d'une sollicitation à 0° , la rupture s'amorce par un décollement fibres/matrice à l'interface entre les mèches de fibres. Les fissures se propagent le long des mèches flottées en suivant successivement le premier et le second fil flotté d'une même rangée. Lorsque la fissure atteint les bords des éprouvettes, la rupture a lieu par rupture des mèches des mailles de la base jersey au niveau des jambes. Dans le cas d'une sollicitation à 90° , la rupture se produit le long d'une colonne de mailles. Les fissures se propagent le long des jambes des mailles entre une colonne de mailles chargées et une colonne de mailles libres jusqu'à fissuration totale de la matrice dans la largeur de l'éprouvette. Dans le cas d'une sollicitation à 45° , plusieurs cas de figure peuvent se produire. Dans un premier cas de figure, l'endommagement est similaire à celui des composites sollicités à 90° , le long d'une colonne de mailles. Cette endommagement est observé pour les composites renforcés de fibres de carbone. Dans un second cas de figure, l'endommagement se produit de manière similaire à celui des composites sollicités à 0° , avec une propagation de la fissure le long des mèches flottées et une rupture dans la direction rangée du renfort. Les composites renforcés de fibres de basalte présentent ces deux modes d'endommagement selon les éprouvettes testées. L'éprouvette ayant subi le second mode d'endommagement atteint la contrainte à rupture la plus élevée (courbe Basalte_JC2_45°-3 de l'annexe G). Les composites renforcés de fibres de verre présentent les deux modes d'endommagement et des fissures apparaissent le long des colonnes et des rangées du renfort (Figure 3.42).

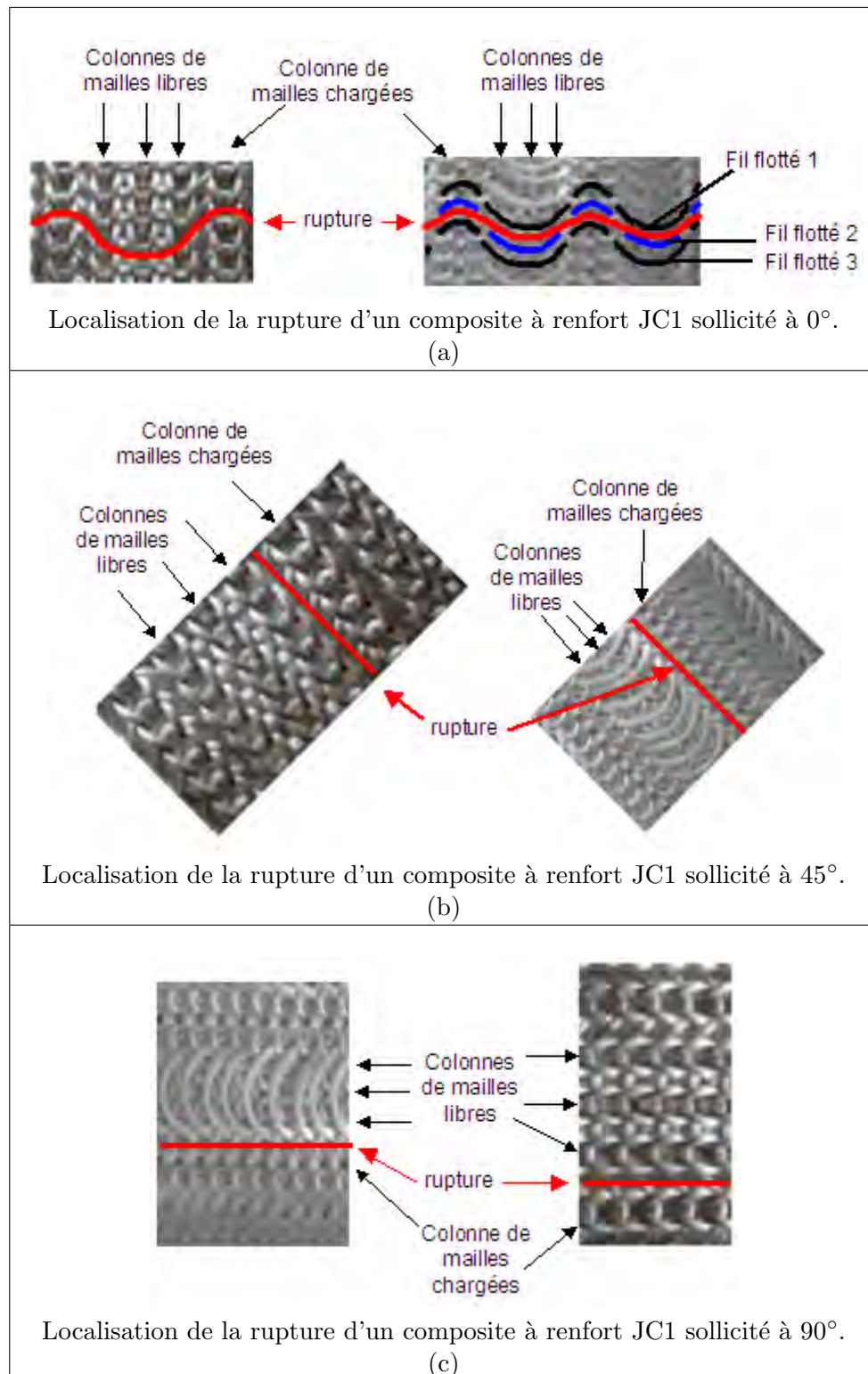


Figure 3.41 – Localisation de la rupture dans les composites à renfort JC1 sollicités à 0° , 45° et 90°

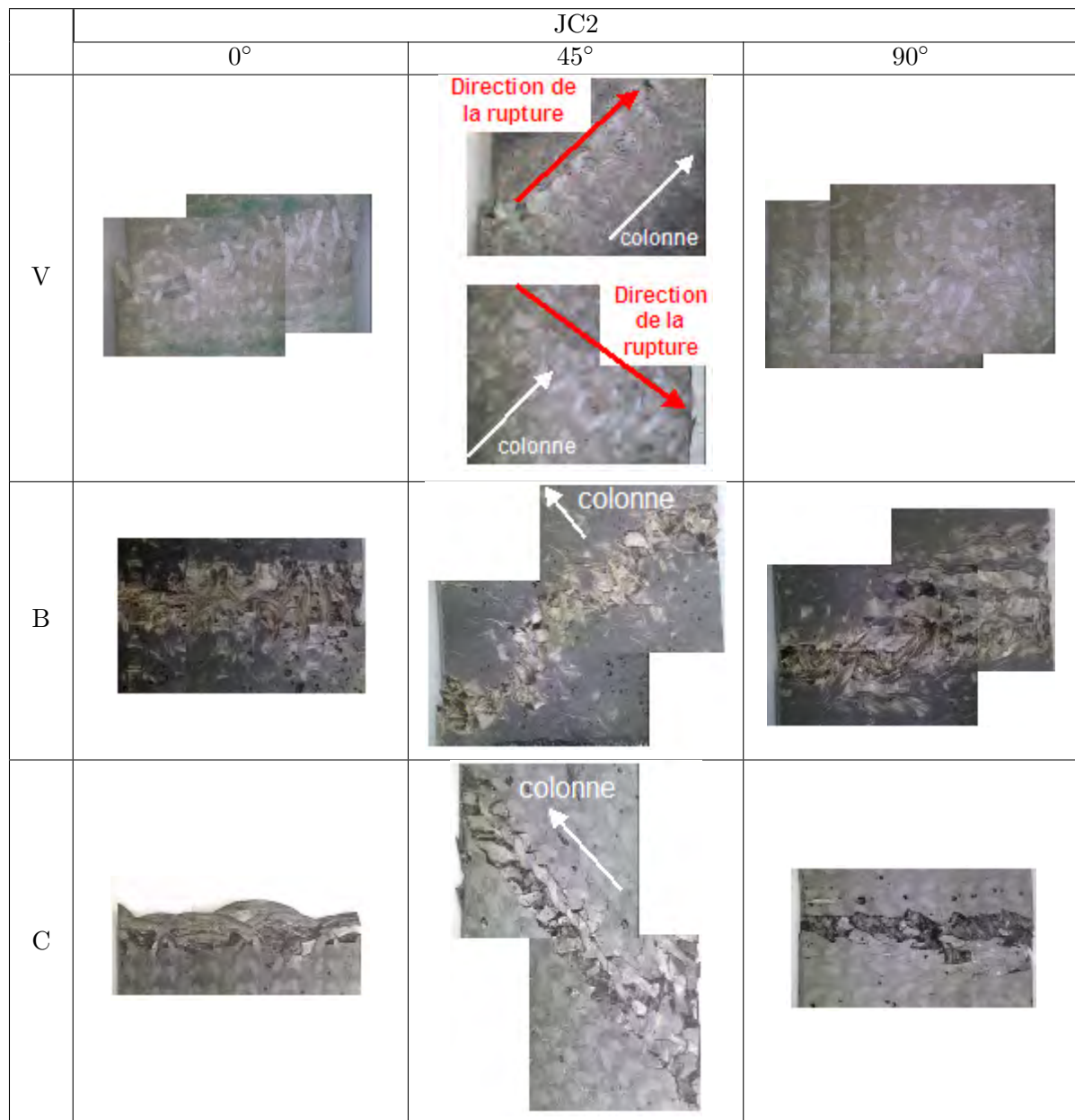


Figure 3.42 – Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort JC2

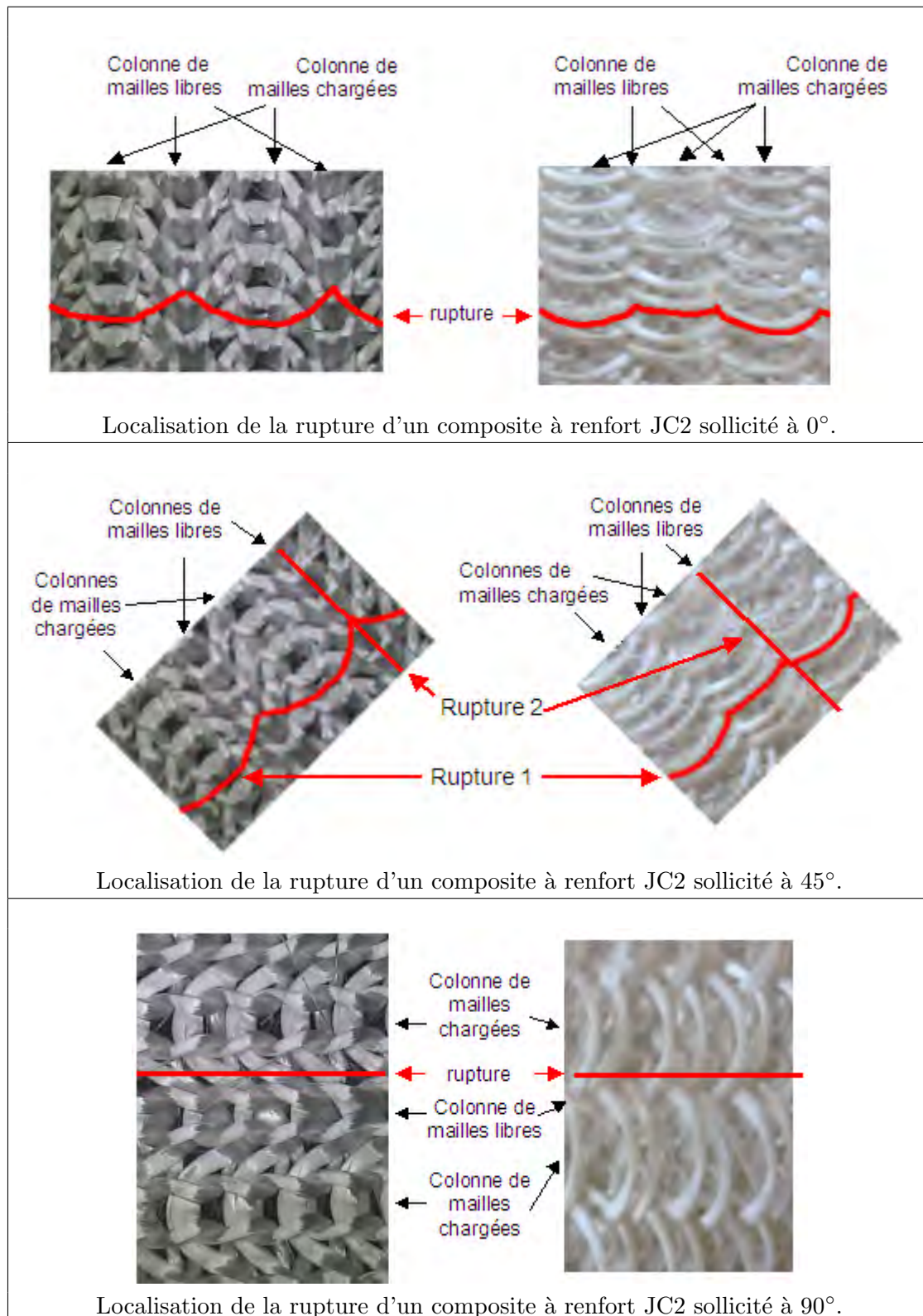


Figure 3.43 – Localisation de la rupture dans les composites à renfort JC2 sollicités à 0° , 45° et 90°

3.4.3.3 Endommagement des composites à renfort JC3

La figure 3.44 présente les photos des éprouvettes rompues des composites renforcés JC3. La rupture a lieu dans la direction transversale de l'éprouvette lorsqu'elle est sollicitée à 0° et 90° . Dans le cas d'une sollicitation à 45° , l'endommagement se produit dans la direction rangée du renfort. La figure 3.45 présente des photos des renforts JC3 sur lesquelles sont localisées les zones de rupture.

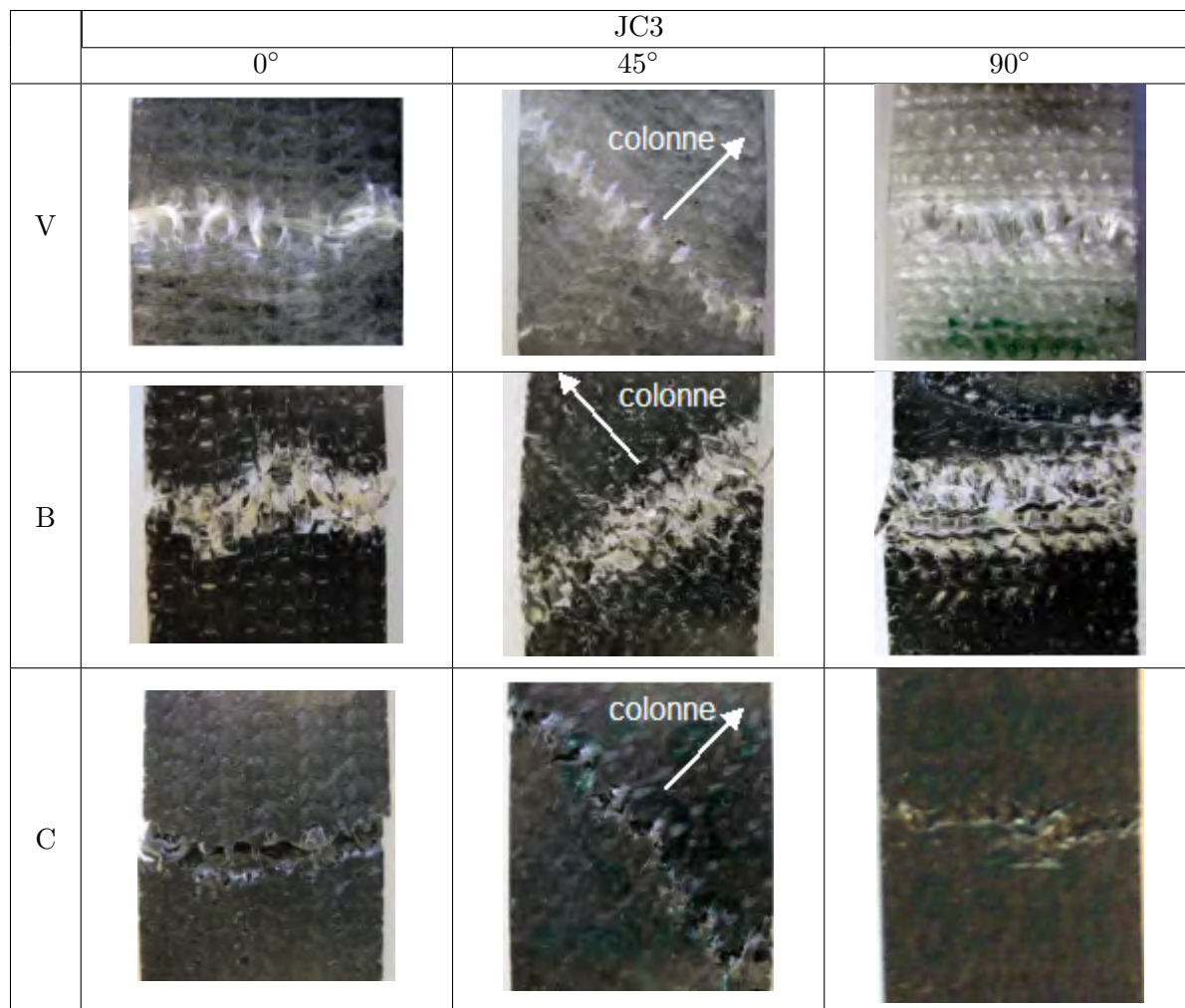


Figure 3.44 – Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort JC3

Dans le cas d'une sollicitation à 0° , la rupture se produit de manière similaire aux composites à renfort JC2, dans un plan orienté perpendiculairement à la direction de sollicitation, le long des mèches flottées. Dans le cas d'une sollicitation à 45° , l'endommagement se produit systématiquement de la même manière que dans le cas d'une sollicitation à 0° . Les fissures se propagent le long des mèches flottées dans la direction rangée du renfort. L'endommagement des composites à renfort JC3 sollicités à 90° se produit de manière similaire aux composites à renfort JC1 et JC2, le long d'une colonne de mailles.

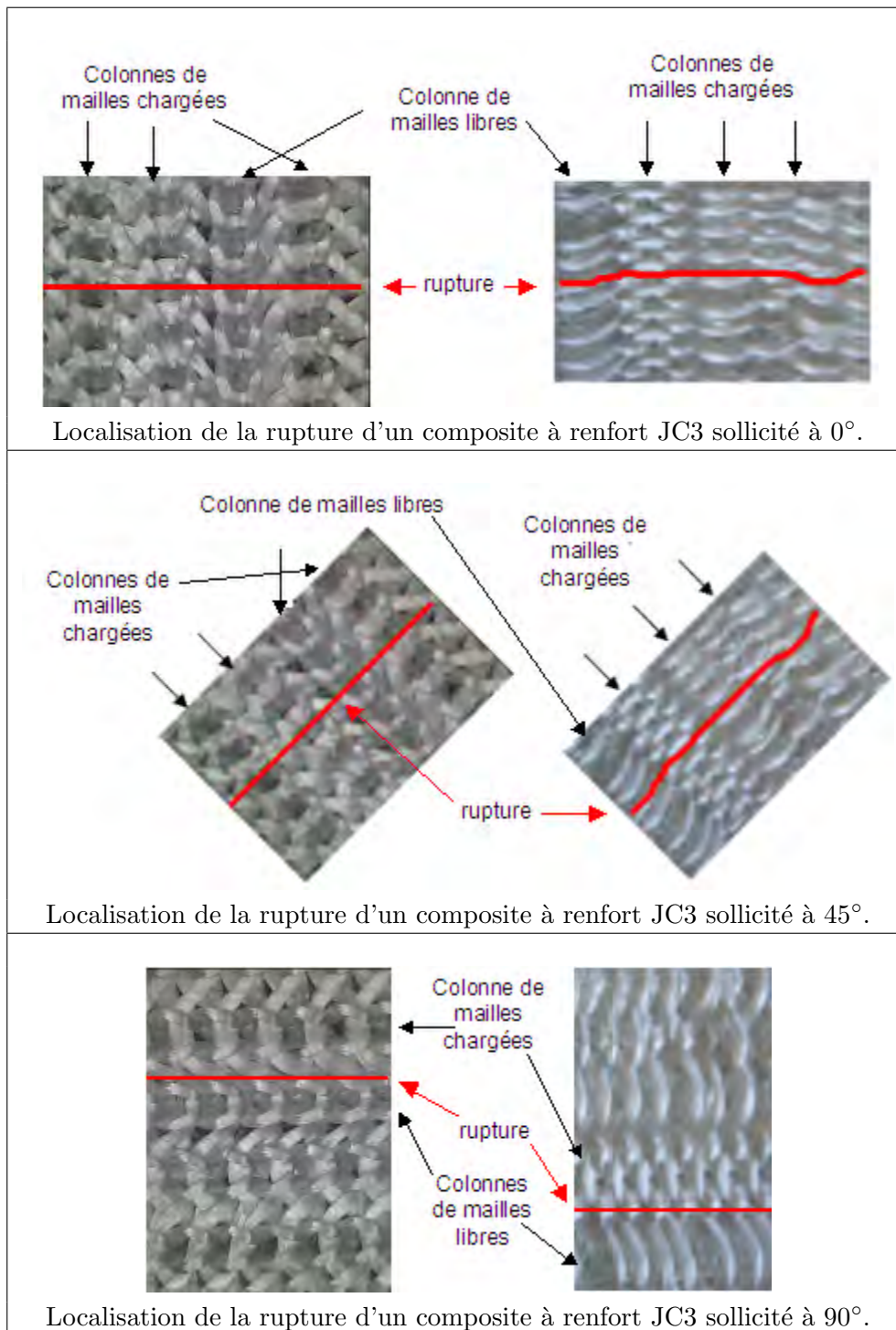


Figure 3.45 – Localisation de la rupture dans les composites à renfort JC3 sollicités à 0°, 45° et 90°

3.4.3.4 Conclusion sur les observations des faciès de rupture des composites à renfort JC

Les observations des faciès de rupture de l'ensemble des composites à renfort JC montre que l'endommagement est lié à la contexture et à la direction de sollicitation. Les fissures s'amorcent aux interfaces entre les zones riches et pauvres en fibres et se propagent le long des mèches fibreuses. Dans le cas d'une sollicitation à 0° , la rupture est orientée dans la direction rangée du renfort, quelle que soit la contexture. Les fissures se propagent le long des mèches flottées orientées dans la rangée du tricot. La présence de ces mèches a pour conséquence de faciliter la propagation des fissures, ce qui explique la diminution de la résistance à la rupture des composites avec l'ajout de fils flottés. Lors d'une sollicitation à 90° , l'endommagement des composites se produit le long des jambes des mailles d'une colonne quelle que soit la contexture du renfort. Les mèches orientées dans la direction rangée du tricot ont pour effet de ralentir la propagation des fissures. Dans le cas d'une sollicitation à 45° , le même mode d'endommagement qu'à 90° est observé pour les composites renforcés de jersey et de JC1. En augmentant le nombre de fils flottés par rangée, la rupture se produit dans la direction rangée du tricot et les fissures se propagent le long des mèches flottées. Les champs de déformation observés dans la section 3.4.2 décrivent des motifs orientés dans la direction colonne quel que soit le renfort du composite.

3.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre le comportement a été étudié dans trois directions des matériaux composites à renforts tricotés en fonction de l'architecture du renfort et de la nature de la fibre. Le travail s'est focalisé dans un premier temps sur les renforts simple et double fontures basiques, le jersey et la côte et dans un second temps, sur l'impact de la présence de mèches flottées dans la rangée du tricot jersey. Le comportement des matériaux composites est fortement lié à l'architecture du renfort et à la nature de la fibre. La structure tridimensionnelle des tricots côte, qui comprend des fibres fortement courbées et qui n'a pas une direction d'orientation des fibres privilégiée, confère au composite des propriétés mécaniques faibles dans toutes les directions et un comportement quasi-isotrope. Malgré une rupture orientée différemment selon la direction de sollicitation, l'endommagement s'initie au même endroit, à l'interface des jambes des mailles et des zones riches en résine. Les fissures se rejoignent dans les zones pauvres en fibres de la matrice. L'architecture du tricot jersey est considérée comme bidimensionnelle et présente une direction d'orientation des fibres privilégiée dans la direction colonne. Ces caractéristiques confèrent au composite des propriétés mécaniques plus élevées dans cette direction et proches à 45° et 90° . Les modes d'endommagement à 0° sont également différents de ceux observés à 45° et 90° . Les mesures de champs de déformation ont mis en évidence une distribution des déformations spécifique liée à la contexture du renfort et à la direction de sollicitation dessinant des motifs périodiques de la dimension des mailles ou proportionnelles à la dimension des mailles. Ces résultats sont valables quelle que soit la nature de la fibre.

L'insertion de mèches non tricotées dans la rangée du renfort jersey a un impact important sur le comportement des composites dans les différentes directions de sollicitations. Cet impact est lié à la distribution des fibres dans la matrice. La diminution des propriétés des composites dans la direction 0° est due à l'augmentation de la proportion de fibres orientées dans la direction transverse à la sollicitation, entraînant une perte des propriétés élastiques du matériau et une diminution de la résistance due à une propagation des fissures plus rapide le long de

ces mèches. Au contraire, une importante augmentation des propriétés des composites est observée à 90° . L'orientation des mèches dans une direction proche de la sollicitation engendre une augmentation du module élastique et leur présence limite la propagation des fissures dans la direction colonne du renfort augmentant la résistance du matériau. La forme ondulée des mèches a pour conséquence d'augmenter également la proportion de fibres orientées à 45° , améliorant les propriétés mécaniques du composite dans cette direction. Les mesures de champs de déformation par stéréo-corrélation d'images mettent en évidence une distribution spécifique à la texture du renfort et à la direction de sollicitation. Ces résultats permettent de conclure sur l'influence importante de la texture sur le comportement et les propriétés du composite. La nature de la fibre a également une influence sur les propriétés mécaniques du composite. Les composites renforcés de fibres de carbone atteignent les meilleures performances dans tous les cas de figure. La nature de la fibre a toutefois un impact plus ou moins prononcé sur le comportement du matériau selon les directions de sollicitation et la structure du tricot. Elle intervient d'autant plus significativement sur les propriétés élastiques lorsque la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation est importante.

Ce chapitre s'est intéressé au comportement des matériaux composites à renforts tricotés d'un point de vue expérimental. Dans le chapitre suivant, une étude théorique du comportement des composites à renforts tricotés est proposée à travers un modèle de prédiction des propriétés élastiques.

Chapitre 4

Modélisation du comportement en traction des textiles tricotés et des composites résultants

Sommaire

4.1	Présentation générale et objectifs du modèle	153
4.2	Modélisation du comportement structural en traction d'un tricot jersey sec	154
4.2.1	Analyse théorique basée sur la théorie de l'élasticité	154
4.2.2	Mise en œuvre numérique	160
4.2.3	Résultats et comparaisons avec l'expérience	173
4.3	Modélisation des propriétés élastiques d'un composite à renfort tricoté	186
4.3.1	Cellule élémentaire représentative et modélisation géométrique du renfort	186
4.3.2	Modèle analytique pour l'estimation des propriétés élastiques	191
4.3.3	Résultats	196
4.4	Conclusion intermédiaire	206

Les chapitres précédents ont été consacrés à l'étude expérimentale du comportement mécanique en traction des textiles tricotés à base de fibres techniques et des matériaux composites résultants. Ces études ont mis en évidence l'influence de la contexture du renfort et de ses caractéristiques géométriques sur le comportement du renfort sec et du composite résultant. L'objet de ce chapitre est de proposer un modèle théorique de prédiction du comportement structural des tricotés et des propriétés élastiques du composite en fonction de la géométrie du renfort. Dans un premier temps, le comportement structural du tricot jersey est étudié à travers un modèle basé sur la théorie de l'élasticité. Ce modèle permet d'extraire la géométrie de la maille utilisée pour alimenter un modèle de prédiction des propriétés élastiques du composite basé sur le principe de l'homogénéisation.

4.1 Présentation générale et objectifs du modèle

Le modèle proposé permet d'estimer les propriétés élastiques d'un matériau composite à renforts tricotés en fonction de la géométrie de la maille jersey. La figure 4.1 schématise le fonctionnement général du modèle. Ce modèle se décompose en deux parties : la première concerne le comportement structural d'un tricot jersey en traction et la seconde traite de la prédiction des propriétés élastiques du composite à renfort tricoté.

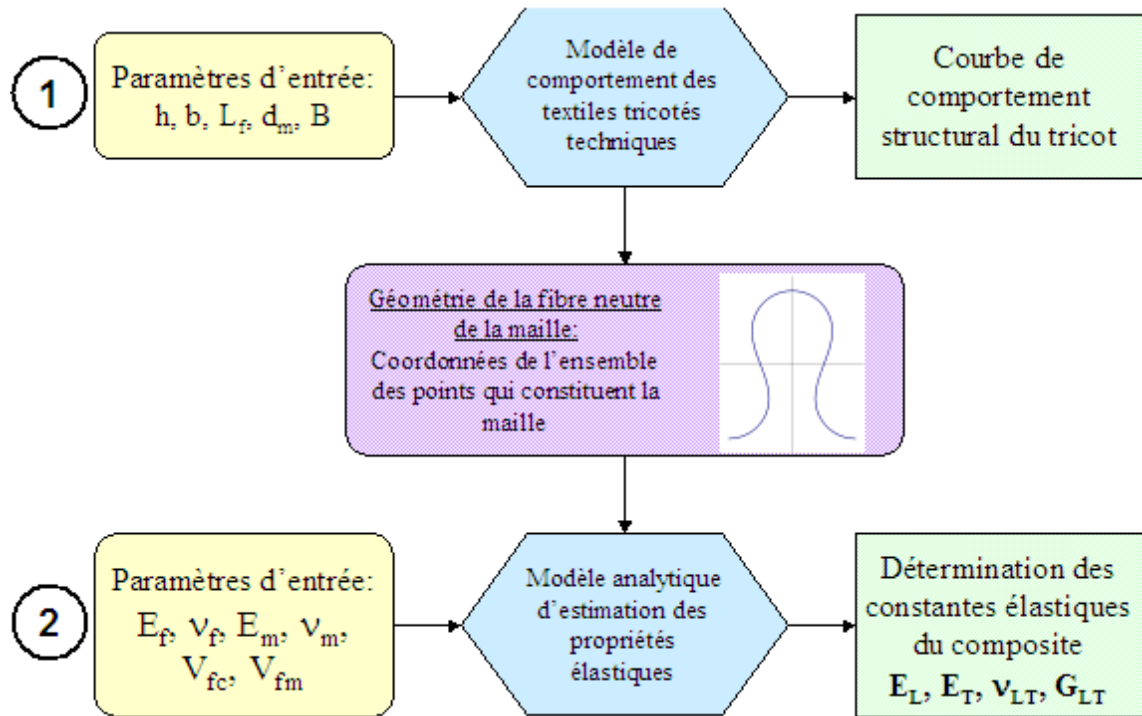


Figure 4.1 – Schématisation du fonctionnement général du modèle

Le modèle de comportement d'un tricot jersey permet à partir des dimensions de la maille de calculer les efforts qui lui sont appliqués en utilisant la théorie de l'élasticité. Il permet également d'obtenir une représentation géométrique de la maille. La géométrie issue de ce modèle est utilisée pour alimenter le modèle de prédiction des propriétés élastiques du

composite basé sur le principe d'homogénéisation. La combinaison des deux modèles permet, à partir des paramètres géométriques de la maille (hauteur, largeur, longueur de fil), des caractéristiques de la mèche (diamètre, rigidité en flexion) et des caractéristiques des matériaux (modules élastiques des fibres et de la résine, taux de fibres dans le composite) d'obtenir la courbe de comportement structural du tricot sec et les constantes élastiques du composite en fonction de la prétension appliquée au renfort avant mise en forme. Ce modèle appliqué aux renforts jersey permet également de prendre en compte la présence de fils flottés dans le renfort du composite.

4.2 Modélisation du comportement structural en traction d'un tricot jersey sec

La modélisation du comportement en traction d'un tricot jersey est basé sur le principe que le textile tricoté se déforme par flexion de la mèche fibreuse. Le modèle présenté ici, basé sur les travaux de Hong et Araújo [62, 21], apporte des améliorations, notamment en prenant en compte une rigidité transversale de la mèche. Il permet, à partir des dimensions de la maille, de déterminer les efforts qui lui sont appliqués. La courbe de comportement en traction (colonne ou rangée) est obtenue en imposant une déformation (augmentation de la hauteur ou de la largeur de la maille respectivement) et en calculant les efforts appliqués à la maille à chaque état déformé. Cette méthode permet également d'obtenir les coordonnées de la fibre neutre de la mèche et de représenter graphiquement la maille complète.

4.2.1 Analyse théorique basée sur la théorie de l'élasticité

4.2.1.1 Hypothèses du modèle

La mèche fibreuse est assimilée à une tige élastique homogène de section circulaire caractérisée par son diamètre d_m et sa rigidité en flexion $B = EI$ (Figure 4.2). Elle est considérée dans un premier temps comme étant inextensible et incompressible. Par la suite, une évolution du diamètre de la mèche par compression transverse sera prise en compte dans la résolution numérique du modèle. Cette déformation est due à un réarrangement des filaments dans la mèche et non à une déformation physique du matériau. Le frottement entre les mèches des mailles adjacentes est négligé. Les propriétés de déformation de la maille sont dues uniquement à la déformation élastique de la mèche par flexion. Toutes les mailles sont identiques dans le tricot et la projection de la maille dans le plan est considérée (Figure 4.3). Les efforts de réaction produits aux croisements entre les mailles adjacentes sont simplifiés par une force concentrée R . La direction de la force de réaction change avec l'état d'extension de la maille et est perpendiculaire à la tangente à la maille en B (point d'application de l'effort R), elle même orientée d'un angle β avec l'axe OX. La distance entre les points B et B' (points d'application des efforts de réaction) de deux mailles adjacentes est égale au diamètre de la mèche d_m .

4.2.1.2 Relations géométriques

L'analyse s'effectue par symétrie sur un quart de la maille. Trois points particuliers sont considérés (Figure 4.3) :

- A ($X_A; Y_A$) : Point d'inflexion de la maille.
- B ($X_B; Y_B$) : Point d'application de la résultante des efforts de réaction.
- C ($X_C; Y_C$) : Sommet de la maille

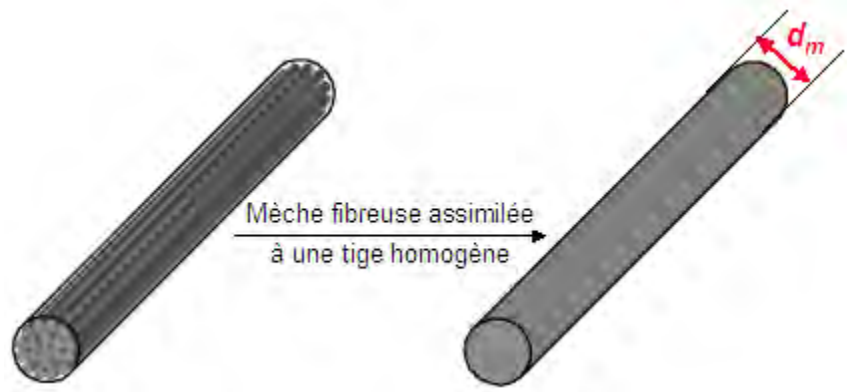


Figure 4.2 – Schématisation de la mèche de fibres assimilée à une tige homogène

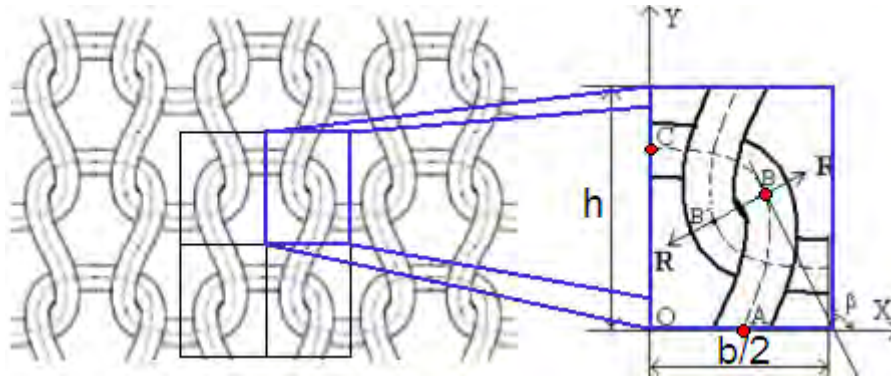


Figure 4.3 – Schématisation du tricot jersey et de la CER

La position de ces points caractéristiques dans le repère de la CER sont reliés aux paramètres géométriques du tricot par les relations géométriques suivantes :

$$\begin{cases} \frac{b}{4} = X_B - \frac{d_m}{2} \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} \frac{h}{2} = Y_B - \frac{d_m}{2} \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} X_B - X_A = \frac{d_m}{2} \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \frac{L_f}{4} = S_{AB} + S_{BC} \end{cases} \quad (4.4)$$

Avec :

- b , h , L_f , respectivement les largeur, hauteur de maille et la longueur de fil par maille ;
- d_m , le diamètre de la mèche ;
- S_{AB} et S_{BC} , les longueurs des portions de maille AB et BC.

4.2.1.3 Équilibre statique du quart de maille

Le quart de maille est isolé et les efforts appliqués à la mèche pour maintenir l'équilibre sont représentés sur la figure 4.4. Au point A, seul un effort P est appliqué (puisque'il s'agit d'un point d'inflexion) orienté d'un angle γ avec l'axe OX qui varie avec la configuration de la maille. Au point C, la résultante R des actions mécaniques de la mèche adjacente sur la mèche isolée est perpendiculaire à la mèche, puisque les frottements sont négligés. Au point C un effort T horizontal et un moment M sont appliqués.

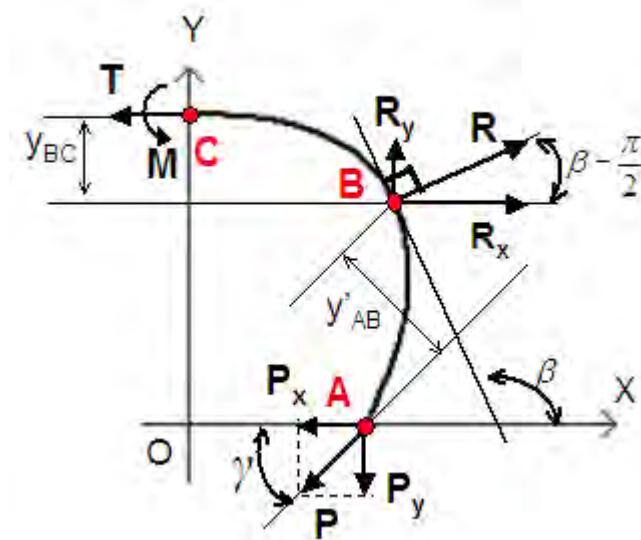


Figure 4.4 – Représentation des forces et moments appliqués sur le quart de maille isolé

L'application du principe fondamental de la statique donne :

$$\begin{cases} \sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \Rightarrow \vec{T} + \vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \\ \sum \vec{\mathcal{M}}_{ext/B} = \vec{0} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\sum \vec{\mathcal{M}}_{ext/B} = \vec{0} \quad (4.6)$$

La projection de l'équation 4.5 sur \vec{x} donne :

$$T = -P \cos(\gamma) + R \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.7)$$

La projection de l'équation 4.5 sur \vec{y} projection :

$$R = P \frac{\sin(\gamma)}{\sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (4.8)$$

La projection de l'équation 4.6 sur \vec{z} après calcul des moments en B donne en remplaçant R et T par leurs expressions en fonction de P :

$$M = P [y'_{AB} + y_{BC} (\cos(\gamma) + \tan(\beta) \sin(\gamma))] \quad (4.9)$$

4.2.1.4 Analyse basée sur la théorie de l'élasticité

L'analyse, basée sur la théorie de l'élasticité en grands déplacements de Timoshenko [87], est appliquée séparément sur deux tronçons AB et BC séparés par l'effort de réaction R .

4.2.1.4.1 Analyse du tronçon AB :

L'analyse du segment AB est identique à l'analyse d'une poutre sur laquelle une seule force est appliquée à son extrémité A, la force P . La figure 4.5 représente le système étudié. L'analyse est effectuée dans le repère $x'Ay'$ et l'axe x' coïncide avec la direction de l'effort P .

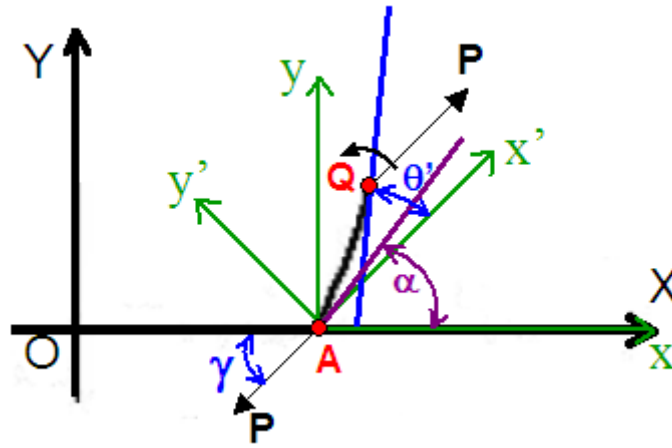


Figure 4.5 – Analyse du tronçon AB

En considérant un point $Q(x', y')$ quelconque sur le segment AB et en calculant les moments en A, l'équation différentielle de la courbe élastique est donnée par :

$$B \frac{d\theta'}{ds'} = Py' \quad (4.10)$$

L'intégration de l'équation 4.10 entre A et B amène aux expressions suivantes donnant les coordonnées du point B dans le repère $Ax'y'$ et la longueur de fil AB.

$$x'_{AB} = \left(\frac{B}{P} \right)^{1/2} \{ f(\epsilon_1, \phi_{1B}) - 2e(\epsilon_1, \phi_{1B}) \} \quad (4.11)$$

$$y'_{AB} = 2 \left(\frac{B}{P} \right)^{1/2} \epsilon_1 \cos \phi_{1B} \quad (4.12)$$

$$S_{AB} = \left(\frac{B}{P} \right)^{1/2} f(\epsilon_1, \phi_{1B}) \quad (4.13)$$

Avec :

α , l'angle entre la tangente à la maille en A et l'axe des abscisses Ox.

$$\epsilon_1 = \cos \frac{(\alpha - \gamma)}{2} \quad (4.14)$$

$$\phi_{1B} = \arcsin \left(\frac{\cos \frac{\beta - \gamma}{2}}{\epsilon_1} \right) \quad (4.15)$$

$$f(\epsilon_1, \phi_{1B}) = F(\epsilon_1, \pi/2) - F(\epsilon_1 - \phi_{1B}) \quad (4.16)$$

$$e(\epsilon_1, \phi_{1B}) = E(\epsilon_1, \pi/2) - E(\epsilon_1 - \phi_{1B}) \quad (4.17)$$

$F(\epsilon_1, \pi/2)$ et $F(\epsilon_1, \phi_{1B})$ sont respectivement les intégrales elliptiques complète et incomplète de première espèce et $E(\epsilon_1, \pi/2)$ et $E(\epsilon_1, \phi_{1B})$ sont respectivement les intégrales elliptiques complètes et incomplètes de seconde espèce. La forme des intégrales elliptiques de première et seconde espèce sont données dans les équations suivantes :

$$F(\epsilon_i, \phi_i) = \int_0^{\phi_i} \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon_i^2 \sin^2 \phi}} d\phi \quad (4.18)$$

$$E(\epsilon_i, \phi_i) = \int_0^{\phi_i} \sqrt{1 - \epsilon_i^2 \sin^2 \phi} d\phi \quad (4.19)$$

La projection des équations 4.11 et 4.12 dans le repère XOY donne les résultats suivants :

$$X_B - X_A = x'_{AB} \cos \gamma - y'_{AB} \sin \gamma \quad (4.20)$$

$$Y_B = x'_{AB} \sin \gamma + y'_{AB} \cos \gamma \quad (4.21)$$

4.2.1.4.2 Analyse du tronçon BC :

L'analyse du segment BC est identique à l'analyse d'une poutre sur laquelle une force T et un moment M sont appliqués. La figure 4.6 représente le système étudié. L'analyse est effectuée dans le repère Cxy. L'axe x coïncide avec la direction de l'effort T.

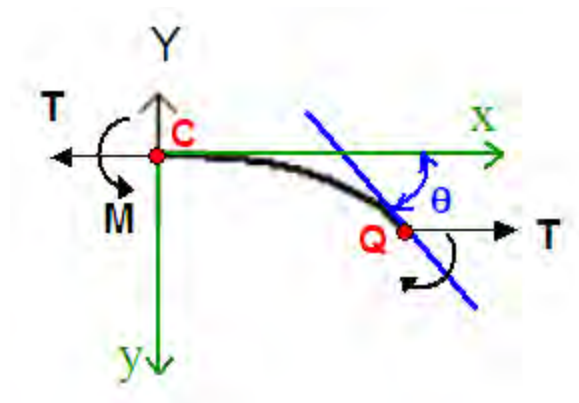


Figure 4.6 – Analyse du tronçon BC

En considérant un point Q(x,y) quelconque sur le segment BC et en calculant les moments en C, l'équation différentielle de la courbe élastique est donnée par :

$$B \frac{d\theta}{ds} = Ty + M \quad (4.22)$$

L'intégration de l'équation 4.22 entre C et B en utilisant les expressions de T et M données dans les équations 4.7 et 4.9 amène aux résultats suivants :

$$X_B = \left(\frac{B}{P}\right)^{1/2} \left(\frac{2}{k_2}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{2}{\epsilon_2^2}\right) E(\epsilon_2, \phi_{2B}) + \left(1 - \frac{2}{\epsilon_2^2}\right) F(\epsilon_2, \phi_{2B}) \right] \quad (4.23)$$

$$S_{BC} = \left(\frac{B}{P}\right)^{1/2} \left(\frac{2}{k_2}\right)^{1/2} F(\epsilon_2, \phi_{2B}) \quad (4.24)$$

Avec :

$$k_2 = k_1 + k_1 \cos \beta + 2\epsilon_1^2 \cos^2 \phi_{1B} \quad (4.25)$$

$$k_1 = \cos \gamma + \sin \gamma \tan \beta \quad (4.26)$$

$$\epsilon_2 = \sqrt{\frac{2k_1}{k_2}} \quad (4.27)$$

$$\phi_{2B} = \frac{\pi - \beta}{2} \quad (4.28)$$

$F(\epsilon_2, \phi_{2B})$ et $E(\epsilon_2, \phi_{2B})$ sont respectivement les intégrales elliptiques de première et deuxième espèces dont les formes sont données aux équations 4.18 et 4.19.

4.2.1.5 Équations décrivant la configuration de la maille et calcul des efforts appliqués

L'analyse basée sur la théorie de l'élasticité appliquée successivement aux tronçons AB et BC du quart de maille étudié a permis d'obtenir des expressions des coordonnées des points caractéristiques A et B dans le repère XOY et des longueurs de fils S_{AB} et S_{BC} en fonction de la rigidité en flexion de la mèche B , de l'effort appliqué P et des angles α , β et γ (Équations 4.13, 4.20, 4.21, 4.23 et 4.24). En remplaçant ces expressions dans les relations géométriques de la maille (Équations 4.1 à 4.4), et après élimination de B et P , le système d'équations décrivant la géométrie de la maille à un état quelconque est donné ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{L_f}{b} = \frac{C_4}{C_1 - C_3} \end{array} \right. \quad (4.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{L_f}{h} = \frac{2C_4}{C_2 + \cot \beta C_3} \end{array} \right. \quad (4.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{L_f}{d_m} = \frac{2 \sin \beta C_4}{C_3} \end{array} \right. \quad (4.31)$$

Avec :

$$C_1 = \sqrt{\frac{2}{k_2}} \left[\frac{2}{\epsilon_2^2} E(\epsilon_2, \phi_{2B}) + \left(1 - \frac{2}{\epsilon_2^2}\right) F(\epsilon_2, \phi_{2B}) \right] \quad (4.32)$$

$$C_2 = [f(\epsilon_1, \phi_{1B}) - 2e(\epsilon_1, \phi_{1B})] \sin \gamma + 2\epsilon_1 \cos \phi_{1B} \cos \gamma \quad (4.33)$$

$$C_3 = [f(\epsilon_1, \phi_{1B}) - 2e(\epsilon_1, \phi_{1B})] \cos \gamma + 2\epsilon_1 \cos \phi_{1B} \sin \gamma \quad (4.34)$$

$$C_4 = f(\epsilon_1, \phi_{1B}) + \sqrt{\frac{2}{k_2}} F(\epsilon_2, \phi_{2B}) \quad (4.35)$$

Les équations 4.29 à 4.31 forment un système de trois équations fortement non linéaires faisant intervenir trois inconnues (α , β et γ). Si les paramètres géométriques de maille (h , b , L_f et d_m) sont connus, une résolution numérique du système permet de déterminer les angles α , β et γ et de calculer les efforts P et T appliqués à la maille. P est déterminé par l'équation 4.36 obtenue à partir des équations 4.4, 4.13, 4.24 et 4.35 et T est déterminée par l'équation 4.37 obtenue à partir des équations 4.7 et 4.8.

$$P = \frac{16BC_4^2}{L_f^2} \quad (4.36)$$

$$T = -k_1 P \quad (4.37)$$

4.2.2 Mise en œuvre numérique

4.2.2.1 Fonctionnement général du modèle

Les efforts qui s'exercent sur une maille sont reliés aux paramètres de la mèche et du tricot par les angles α , β et γ . Ces angles sont déterminés par la résolution numérique d'un système d'équations fortement non linéaires. Lors d'un essai de traction, les valeurs des paramètres de maille évoluent (augmentation de h ou de b pour une traction dans la direction colonne ou rangée respectivement). La simulation d'un essai de traction s'effectue en imposant une déformation, c'est à dire en augmentant l'un des paramètres de maille selon la direction de sollicitation souhaitée. Pour chaque niveau de déformation, les efforts sont calculés après détermination de α , β et γ , ce qui amène à une courbe d'effort-déformation. La traction colonne et la traction rangée suivent des procédures différentes. Une initialisation du système est préalablement nécessaire.

4.2.2.2 Résolution numérique du système

A chaque état, un système de trois équations non linéaires (Équations 4.38) est résolu numériquement en utilisant une méthode d'optimisation visant à déterminer le meilleur jeu de paramètres (α, β, γ) qui permet d'obtenir les valeurs de K_1 , K_2 et K_3 les plus proches des paramètres connus K_{1obj} , K_{2obj} et K_{3obj} à identifier.

$$\begin{cases} K_1 = f_1(\alpha, \beta, \gamma) \\ K_2 = f_2(\alpha, \beta, \gamma) \\ K_3 = f_3(\alpha, \beta, \gamma) \end{cases} \quad (4.38)$$

Un algorithme de Quasi-Newton est utilisé pour minimiser la fonction objectif suivante définie par la méthode des moindres carrés.

$$f_{obj} = (K_1 - K_{1obj})^2 + (K_2 - K_{2obj})^2 + (K_3 - K_{3obj})^2 \quad (4.39)$$

4.2.2.3 Initialisation

L'initialisation consiste à déterminer l'état d'équilibre de la maille au repos. Son fonctionnement est schématisé à la figure 4.7. Les données d'entrée sont les paramètres géométriques de la maille h_0 , b_0 , L_f et les caractéristiques de la mèche d_m et B . La résolution du système 4.40 permet de déterminer le meilleur jeu de paramètres $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ et de calculer les efforts P_0 et T_0 en utilisant les équations 4.36 et 4.37.

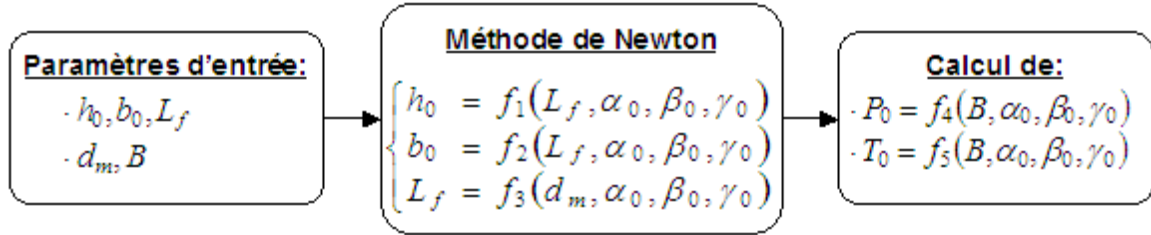


Figure 4.7 – Initialisation du modèle de comportement du tricot jersey

$$\begin{cases} h_0 = f_1(L_f, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \\ b_0 = f_2(L_f, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \\ L_f = f_3(d_m, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \end{cases} \quad (4.40)$$

4.2.2.4 Traction colonne sans évolution du diamètre de mèche

L'essai de traction colonne est simulé en imposant une augmentation de la hauteur de maille. Le fonctionnement du modèle est schématisé à la figure 4.8.

Deux étapes successives sont considérées et séparées par le blocage des mailles qui se produit lorsque les pieds des mailles adjacentes entrent en contact (Figure 4.9). La largeur de la maille est alors égale à quatre fois le diamètre de la mèche, celle-ci étant incompressible. Le point de blocage est défini par la condition suivante :

$$b_i = 4 \times d_m \quad (4.41)$$

4.2.2.4.1 Avant blocage de la maille :

Avant blocage, l'augmentation de la hauteur de maille entraîne une diminution de la largeur de maille qui est inconnue. Le système est réduit à deux équations. Une nouvelle hypothèse est émise pour permettre d'obtenir une équation supplémentaire nécessaire à la résolution du système. Cette hypothèse considère que la déformation dans la direction colonne due à une augmentation de l'effort P_y n'entraîne aucune variation de l'effort transverse T qui reste égal à T_0 . La mèche étant considérée inextensible, la longueur de fil reste constante tout au long de l'essai. Pour chaque niveau de déformation, le système à résoudre est le suivant :

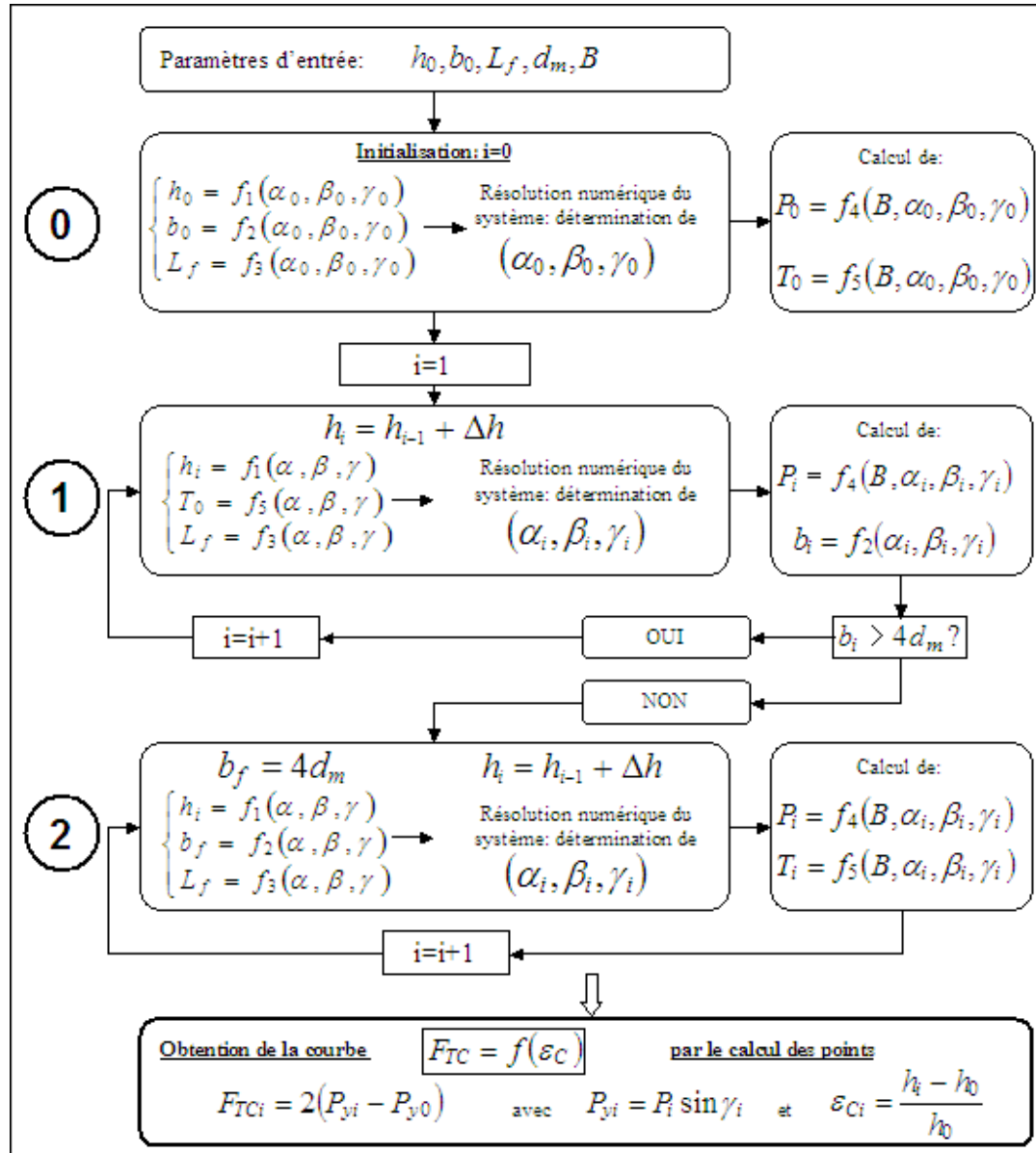


Figure 4.8 – Fonctionnement du modèle en traction colonne sans évolution du diamètre de mèche

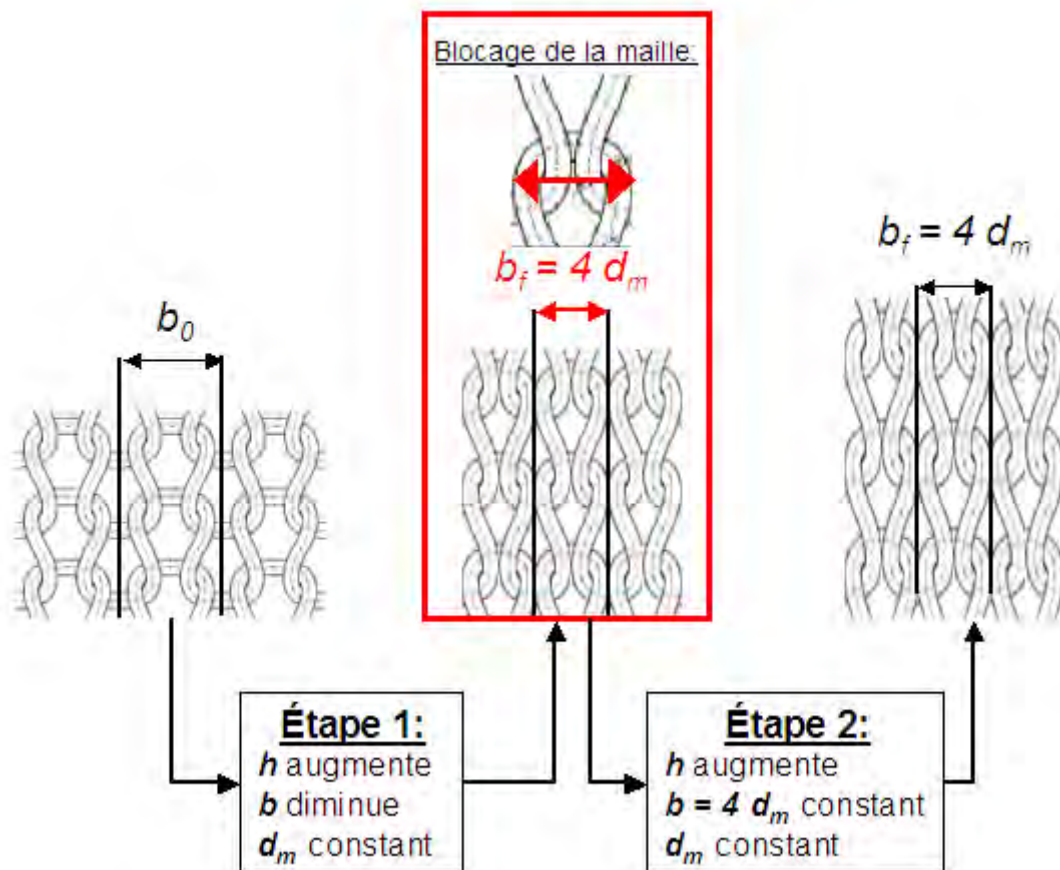


Figure 4.9 – Illustration de la traction colonne sans évolution du diamètre de mèche

$$\begin{cases} h_i = h_{i-1} + \Delta_{hi} = f_1(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ L_f = f_3(d_m \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ T_0 = f_5(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \end{cases} \quad (4.42)$$

La détermination des angles α_i , β_i et γ_i par la méthode décrite au paragraphe 4.2.2.2 permet de calculer l'effort P_{yi} appliqué au quart de maille et la largeur de maille b_i pour chaque niveau de déformation. A chaque incrément de déformation, la condition suivante est testée :

$$b_i > 4 \times d_m?$$

Si elle est vraie, cette même étape est répétée en augmentant la hauteur de maille jusqu'au blocage de la maille. Si elle est fausse, le blocage est atteint et la seconde étape a lieu.

4.2.2.4.2 Après blocage des mailles :

A partir du blocage, la largeur de la maille reste constante puisque la mèche est considérée comme incompressible. Pour chaque niveau de déformation, le système 4.44 est résolu.

$$\begin{cases} h_i = h_{i-1} + \Delta_{hi} = f_1(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ b_f = 4 \times d_m = f_2(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ L_f = f_3(d_m, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \end{cases} \quad (4.44)$$

La détermination des angles α_i , β_i et γ_i par la méthode décrite au paragraphe 4.2.2.2 permet de calculer l'effort P_{yi} appliqué au quart de maille.

4.2.2.4.3 Choix du diamètre de la mèche :

Dans ce modèle, le diamètre de la mèche est constant tout au long de l'essai. Étant donné qu'il définit l'instant où le blocage des mailles se produit, sa valeur est déterminée en considérant un arrangement compact des fibres c'est à dire un empilement hexagonal parfait des filaments dans la mèche. L'équation permettant de calculer d_m a déjà été définie au chapitre 2 (Équation 2.1).

4.2.2.5 Traction colonne avec évolution du diamètre de mèche

En définissant un diamètre constant de mèche, le blocage des mailles se produit brutalement pour une déformation précise. En réalité, l'arrangement des fibres n'est pas compact au début de l'essai et le blocage des mailles se produit progressivement. La section de la mèche varie et particulièrement au niveau des croisements entre les mailles adjacentes. Cette modification de section est due à une réorganisation des filaments par compression transverse et non pas à une modification physique du matériau. De ce fait, sa prise en compte ne modifie pas l'analyse théorique et n'intervient que dans la mise en œuvre numérique du modèle. La forme de la section de la mèche (circulaire ou elliptique) ainsi que l'arrangement compact ou espacé des filaments ont une influence négligeable sur le moment quadratique et le module de flexion (Annexe A). La variation de la section intervient donc seulement dans les relations

géométriques de la maille et le calcul des angle α , β et γ . Les relations géométriques (Équations 4.1 à 4.4) ont été déterminées pour une largeur constante de la projection de la mèche dans le plan. La mèche est donc considérée de section circulaire avec un diamètre qui varie au cours de l'essai. La figure 4.10 décrit le fonctionnement du modèle de traction colonne avec évolution du diamètre de la mèche.

Une étape intermédiaire entre la traction colonne avant et après blocage (notée 1 bis) est introduite dans le fonctionnement du modèle. La variation du diamètre de la mèche est prise en compte dans cette phase (Figure 4.11). Les autres étapes du modèle restent identiques à celles décrites dans la section précédente. Avant blocage, l'effort de traction varie peu et le diamètre de la mèche est considéré constant. La première étape est effectuée avec un diamètre de mèche initial d_{m0} défini en considérant un arrangement espacé des filaments et la dernière étape avec un diamètre final d_{mf} défini en considérant un arrangement compact des filaments. La phase intermédiaire correspond au blocage des mailles pendant laquelle le diamètre de la mèche diminue par compression transverse.

4.2.2.5.1 Phase intermédiaire de blocage des mailles :

Cette étape débute lorsque la condition suivante n'est plus vérifiée.

$$b_i > 4 \times d_{m0}?$$

Dans cette phase, la largeur de la maille est considérée égale à quatre fois le diamètre dont la valeur diminue. La prise en compte de cette diminution est expliquée dans la section 4.2.2.5.2. Pour chaque niveau de déformation, le système suivant est résolu :

$$\begin{cases} h_i = h_{i-1} + \Delta_{hi} = f_1(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ b_i = 4 \times d_{mi} = f_2(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ L_f = f_3(d_{mi}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \end{cases} \quad (4.46)$$

$$(4.47)$$

La détermination des angles α_i , β_i et γ_i par la méthode décrite au paragraphe 4.2.2.2 permet de calculer l'effort P_{yi} appliqué au quart de maille. Cette étape a lieu jusqu'à ce que le diamètre de la mèche atteigne la valeur d_{mf} . A chaque incrément de déformation, la condition suivante est testée :

$$d_{mi} > d_{mf}?$$

Si elle est vraie, la même opération est répétée en augmentant la hauteur de maille. Si elle est fausse, le blocage des mailles définitif est atteint et la dernière phase du modèle débute.

4.2.2.5.2 Estimation de l'évolution du diamètre de la mèche :

La variation du diamètre de la mèche par compression entraîne une augmentation de l'effort de réaction entre les mailles adjacentes. Cette augmentation est répercutée sur l'effort de traction colonne noté F_{TC} . L'objectif est d'établir une relation entre le diamètre de la mèche et l'effort de traction. Il est difficile d'établir une loi physique de comportement en compression de la mèche lors de l'essai de traction. La relation entre le diamètre et l'effort de traction utilisée dans le modèle est déterminée en faisant l'analogie entre le comportement d'un tricot sec sollicité en compression transverse et la compression de la mèche lors de l'essai

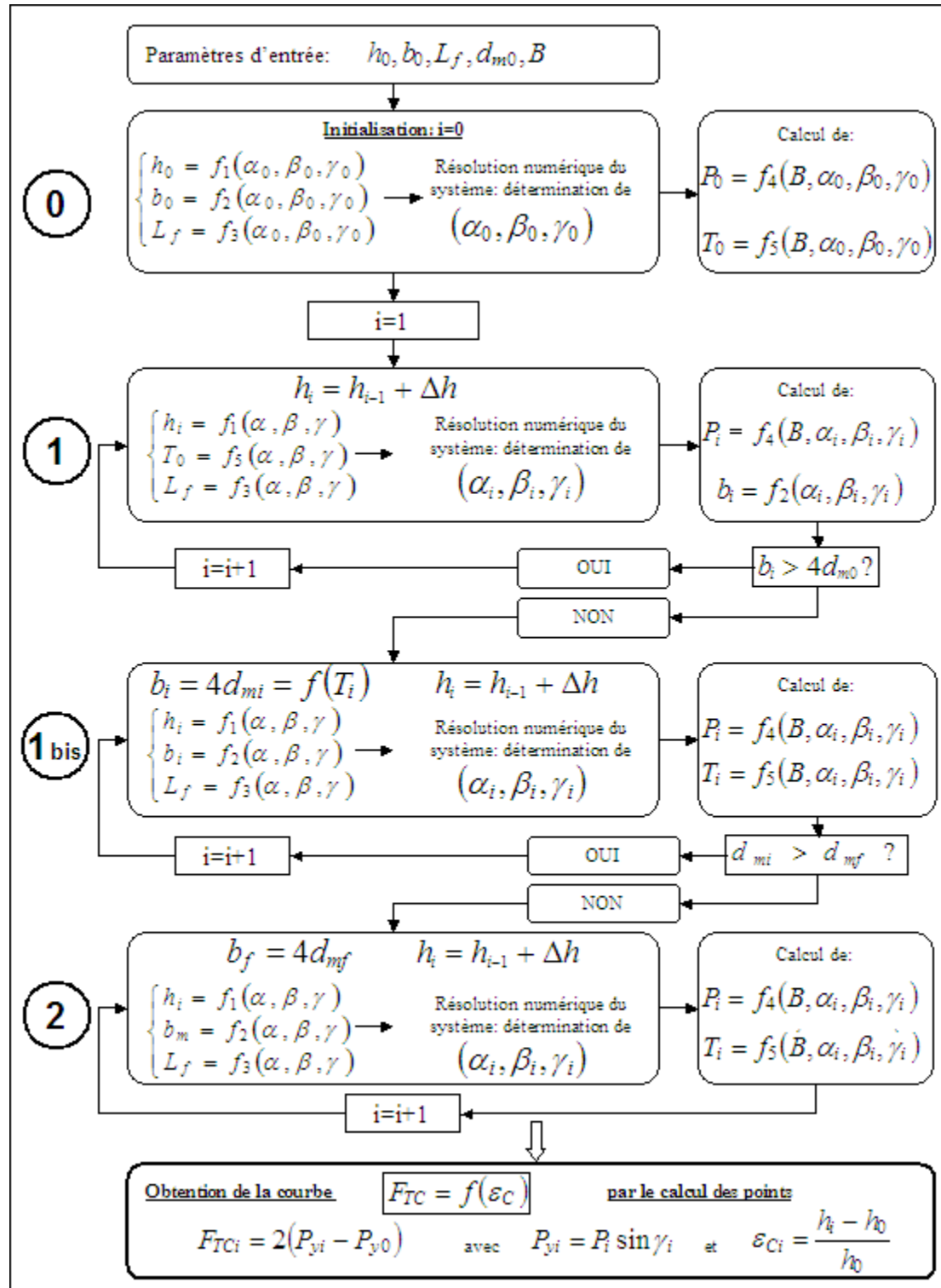


Figure 4.10 – Fonctionnement du modèle en traction colonne avec évolution du diamètre de mèche

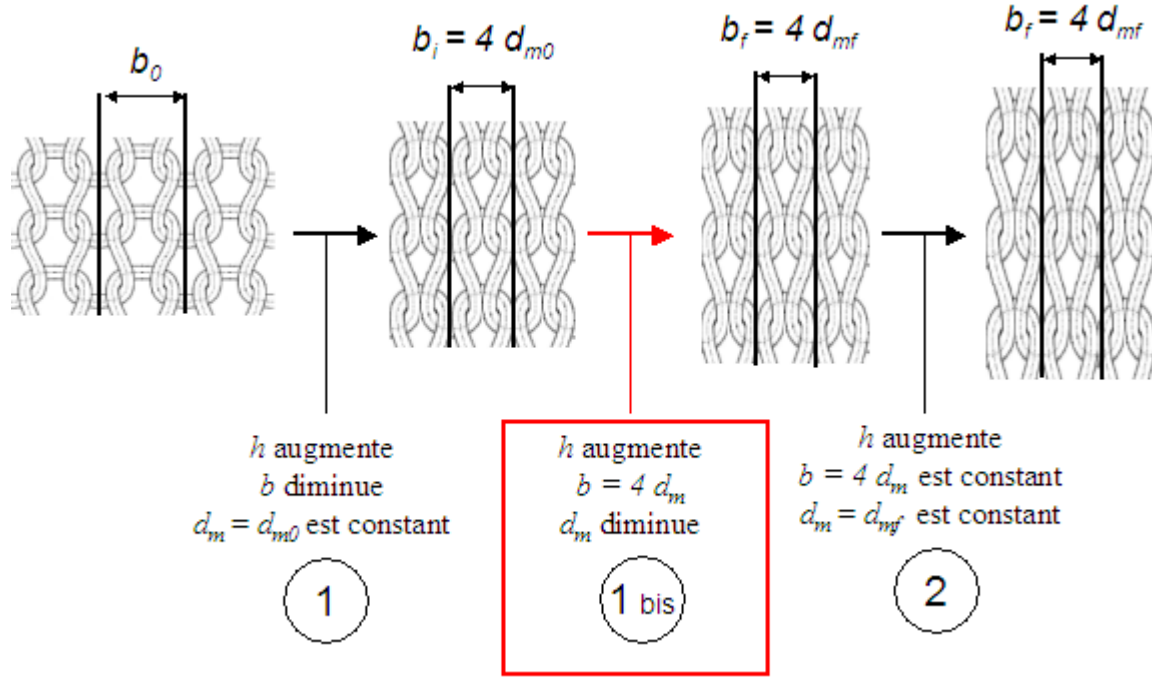


Figure 4.11 – Illustration de la traction colonne avec évolution du diamètre de mèche

de traction.

Des essais de compression transverse sont réalisés sur des tricots jersey en fibre de verre et de basalte. Les essais ont été réalisés avec une machine électromécanique Instron 5800R équipée de plateaux de compression en acier de 150 mm de diamètre. Les essais sont pilotés en déplacement de la traverse à une vitesse constante de 12 mm.min^{-1} . En considérant que l'épaisseur d'un tricot jersey correspond à deux fois celle de la mèche, les résultats des essais de compression donnés à la figure 4.12 représentent la moitié de l'épaisseur en fonction de la charge de compression F_{comp} . L'épaisseur initiale des tricots jersey a été mesurée sous une pression de $0,005 \text{ MPa}$ dans la section 2.1.2.2, et permet de recalculer la courbe. L'effort de compression F_{comp} est déterminé par l'équation 4.48. L'effort surfacique mesuré est multiplié par la surface de la CER S_{CER} puis divisé par deux puisque deux points de contact entre les mèches des mailles adjacentes sont considérés lors de la compression du tricot et un seul en compression de la mèche par traction du tricot (Figure 4.13).

$$F_{comp} = \frac{F \times S_{CER}}{2 \times S_{plateaux}} \quad (4.48)$$

Avec :

- F_{comp} [N] : Charge de compression rapportée à une mèche de la CER
- F [N] : Effort appliqué
- S_{CER} : Surface de la CER égale à $(b \times h)/2$
- $S_{plateaux} = \frac{150^2 \pi}{4}$: Surface des plateaux de compression

La courbe obtenue peut être interpolée par une fonction de type logarithmique qui permet

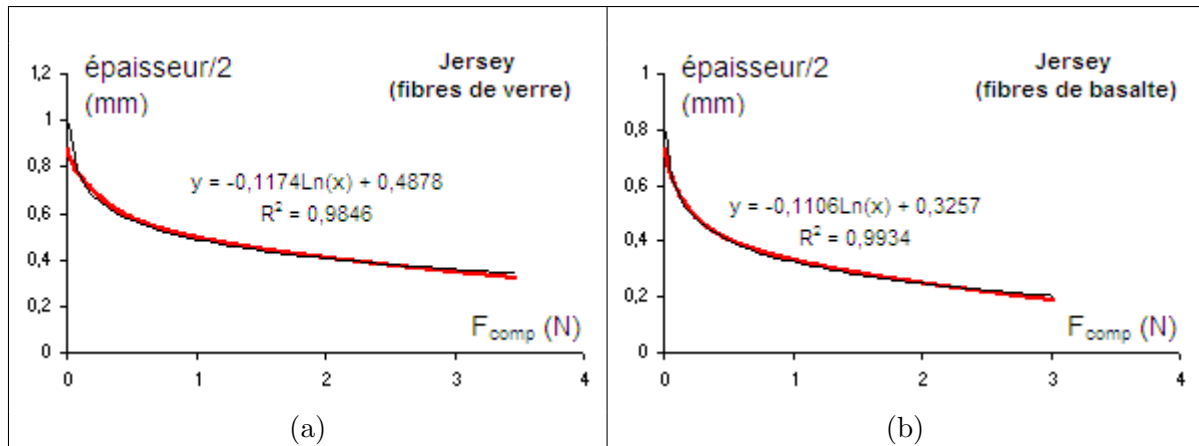


Figure 4.12 – Variation de la demi épaisseur du tricot en fonction de la charge de compression rapporté à une mèche de la CER d'un (a) jersey en fibres de verre et (b) d'un jersey en fibres de verre

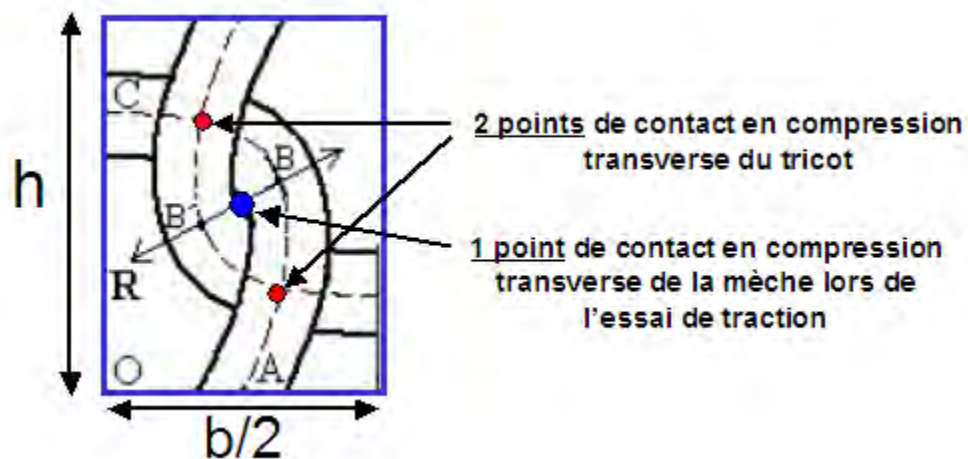


Figure 4.13 – Représentation de la CER du tricot jersey

de simplifier la mise en données :

$$\frac{e}{2} = a \ln F_{comp} + b \quad (4.49)$$

Étant donné que tous les efforts s'appliquant sur la mèche sont liés, cette forme est choisie dans le modèle pour calculer le diamètre de la mèche en fonction de l'effort de traction. L'évolution du diamètre de la mèche est donné par :

$$d_m = a \ln F_{TC} + b \quad (4.50)$$

Les coefficients a et b sont déterminés à partir de d_{m0} , d_{mf} , $F_{TC}(1)$ et $F_{TC}(2)$ (Équations 4.51 et 4.52). La valeur du diamètre initial d_{m0} est estimée en divisant l'épaisseur mesurée sur les tricots secs par deux. La valeur du diamètre final d_{mf} correspond à la valeur de d_m obtenue pour un empilement hexagonal parfait des filaments. $F_{TC}(1)$ et $F_{TC}(2)$ correspondent aux valeurs de l'effort de traction à la fin de la phase 1 et de la phase 2. $F_{TC}(1)$ est déterminée directement par le modèle. La valeur de $F_{TC}(2)$ n'est pas connue, elle est estimée à partir des courbes de traction expérimentales dans le domaine d'application du modèle.

$$a = \frac{d_{m0} - d_{mf}}{\ln(F_{TC}(1)) - \ln(F_{TC}(2))} \quad (4.51)$$

$$b = -\frac{d_{m0} - d_{mf}}{\ln(F_{TC}(1)) - \ln(F_{TC}(2))} \ln(F_{TC}(1)) + d_{m0} \quad (4.52)$$

4.2.2.6 Traction rangée

Le fonctionnement du modèle est schématisé à la figure 4.14.

L'essai de traction rangée est simulé en imposant une augmentation de la largeur de maille b . Celle-ci entraîne une diminution de la hauteur de maille h qui est inconnue. Comme pour la traction colonne, la longueur de fil par maille L_f reste constante puisque la mèche est considérée inextensible. Cependant, l'hypothèse donnant l'effort T constant n'est plus réaliste et il est nécessaire d'émettre une nouvelle hypothèse pour permettre de déterminer les paramètres α , β et γ . Dans le modèle de départ, Araújo et al. émettent l'hypothèse que la déformation dans la direction rangée se produit par le redressement de la portion de mèche entre B et C qui s'aligne dans la direction de sollicitation sans glissement entre la mailles adjacentes. La longueur de mèche S_{BC} est donc considérée constante. Le système d'équations permettant de déterminer α , β et γ devient :

$$\begin{cases} b_i = b_{i-1} + \Delta b_i = f_2(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ L_f = f_3(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ S_{BC0} = f_5(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \end{cases} \quad (4.53)$$

En réalité, les mailles glissent les unes par rapport aux autres, le point B se déplace et S_{BC} augmente. L'augmentation de S_{BC} au cours de l'essai n'est pas connue. Son évolution est approchée par une relation linéaire entre la variation de S_{BC} et la déformation rangée :

$$S_{BCi} = a \Delta b_i + S_{BC0} \quad (4.54)$$

Le coefficient a est déterminé à partir de S_{BC0} , S_{BCf} , b_0 et b_f . S_{BC0} est déterminé à l'initialisation et b_0 correspond à la largeur de maille à l'état initial. S_{BCf} correspond à la

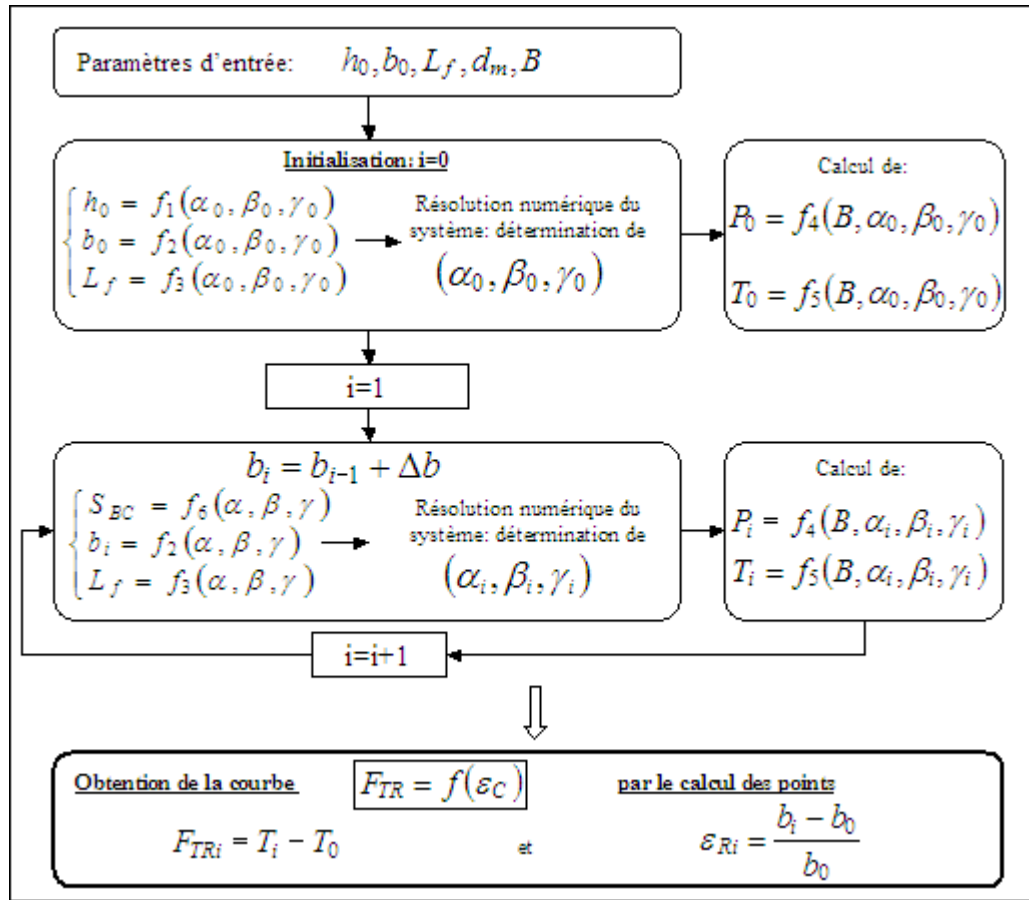


Figure 4.14 – Fonctionnement du modèle de traction rangée

longueur de mèche entre B et C maximale que peut atteindre la mèche et b_f correspond à la largeur de la maille pour laquelle $S_{BC} = S_{BCf}$. La valeur de S_{BCf} est approchée en considérant une forme idéalisée de la maille dans la configuration d'extension maximale (Figure 4.15). Cette géométrie est obtenue pour un angle $\beta = \pi/2$, ce qui permet de déterminer, les coordonnées de B et d'approcher la valeur de S_{BCf} en assimilant AB à une portion de mèche linéaire :

$$X_B - X_A = \frac{d_m}{2} \quad (4.55)$$

$$Y_B = \frac{h}{2} = d_m \quad (4.56)$$

$$S_{BCf} = \frac{L_f}{4} - S_{ABf} = \frac{L_f}{4} - \sqrt{(X_B - X_A)^2 + Y_B^2} \quad (4.57)$$

La valeur de b_f , est déterminée au début de la courbure de la courbe expérimentale. Le système d'équations permettant de déterminer les angles α_i , β_i et γ_i à chaque niveau de déformation devient :

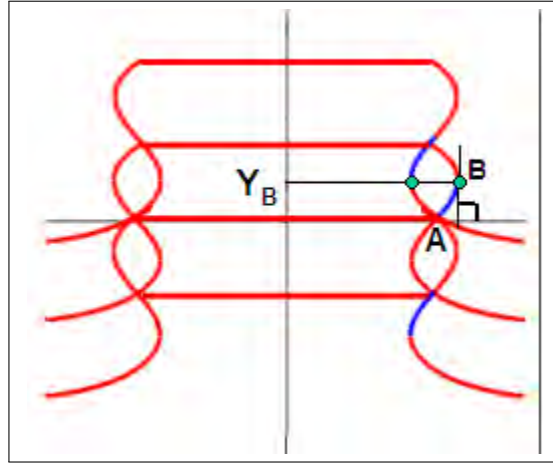


Figure 4.15 – Forme idéalisée de la maille dans la configuration d'extension maximale en rangée

$$\begin{cases} b_i = b_{i-1} + \Delta b_i = f_2(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ L_f = f_3(L_f, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \\ S_{BCi} = f_5(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \end{cases} \quad (4.58)$$

S_{BCi} est déterminée avec un certain nombre d'approximations telles que le choix de son évolution linéaire en fonction de l'extension de la maille ainsi que la difficulté de localiser précisément b_f sur les courbes expérimentales en raison des faibles efforts en jeu. La résolution numérique du système 4.58 par la méthode décrite à la section 4.2.2.2 est donc réalisée en affectant un poids plus faible à l'identification de S_{BCi} qu'à celle de L_f et b_i dans la fonction objectif 4.59.

$$f_{obj} = (b_i - b_{iobj})^2 + (L_f - L_{fobj})^2 + 0,1 (S_{BCi} - S_{BCiobj})^2 \quad (4.59)$$

La détermination des angles α_i , β_i et γ_i permet de calculer l'effort T_i appliqué au quart de maille.

4.2.2.7 Calcul des courbes de comportement :

– Traction colonne :

La courbe de comportement théorique est donnée en effort de traction par colonne F_{TC} en fonction de la déformation ϵ_c calculés en utilisant les équations 4.60 et 4.61. A l'état initial P_{y0} n'est pas nul, il doit donc être soustrait à l'effort P_y calculé pour obtenir la charge appliquée. Les calculs s'effectuant sur un quart de maille de la largeur d'une demi colonne, l'effort de traction calculé est multiplié par deux pour obtenir l'effort par colonne.

$$F_{TCi} = 2(P_{yi} - P_{y0}) \quad (4.60)$$

$$\epsilon_{ci} = \frac{\Delta h_i}{h_0} \quad (4.61)$$

– Traction rangée :

La courbe de comportement théorique représente l'effort par rangée F_{TR} en fonction de la déformation ϵ_R calculées avec les équations 4.62 et 4.63.

$$F_{TRi} = T_i - T_0 \quad (4.62)$$

$$\epsilon_{Ri} = \frac{\Delta b_i}{b_0} \quad (4.63)$$

4.2.2.8 Représentation géométrique de la maille

Quel que soit le niveau de déformation, le modèle permet de calculer les coordonnées des points de la fibre neutre de la maille. L'intégration des équations différentielles 4.10 et 4.22 respectivement entre A et B et entre B et C permet d'obtenir les expressions des coordonnées de B suivantes :

– Intégration de 4.10 :

$$\begin{aligned} X_B - X_A = & \sqrt{\frac{B}{P}} \left[\left(\int_{\phi_{1B}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi_1}{\sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1}} - 2 \int_{\phi_{1B}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1} d\phi_1 \right) \cos \gamma \right] \\ & - 2\sqrt{\frac{B}{P}} \epsilon_1 \cos \phi_{1B} \sin \gamma \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\begin{aligned} Y_B = & \sqrt{\frac{B}{P}} \left[\left(\int_{\phi_{1B}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi_1}{\sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1}} - 2 \int_{\phi_{1B}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1} d\phi_1 \right) \right] \sin \gamma \\ & - 2\sqrt{\frac{B}{P}} \epsilon_1 \cos \phi_{1B} \cos \gamma \end{aligned} \quad (4.65)$$

– Intégration de 4.22 :

$$X_B = \sqrt{\frac{B}{P}} \sqrt{\frac{2}{k_2}} \int_0^{\phi_{2B}} \frac{1 - \sin^2 \phi_2}{\sqrt{1 - \epsilon_2^2 \sin^2 \phi_2}} d\phi_2 \quad (4.66)$$

$$Y_B = \sqrt{\frac{B}{P}} \sqrt{\frac{1}{k_2}} \left(\frac{2}{\epsilon_2^2} \right) \int_0^{\phi_{2B}} \frac{2 \sin \phi_2 \cos \phi_2}{\sqrt{1 - \epsilon_2^2 \sin^2 \phi_2}} d\phi_2 \quad (4.67)$$

La discrétisation de l'intégration des équations le long de chacun des tronçons permet d'obtenir les coordonnées des points $Q1(X_{Q1}, Y_{Q1})$ et $Q2(X_{Q2}, Y_{Q2})$ décrivant la géométrie complète des tronçons AB et BC de la maille (Équations 4.68 à 4.71).

$$\begin{aligned}
 X_{Q1} - X_A &= \sqrt{\frac{B}{P}} \left[\left(\int_{\phi_{Q1}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi_1}{\sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1}} - 2 \int_{\phi_{Q1}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1} d\phi_1 \right) \cos \gamma \right] \\
 &\quad - 2\sqrt{\frac{B}{P}} \epsilon_1 \cos \phi_{Q1} \sin \gamma
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{Q1} &= \sqrt{\frac{B}{P}} \left[\left(\int_{\phi_{Q1}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\phi_1}{\sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1}} - 2 \int_{\phi_{Q1}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \epsilon_1^2 \sin^2 \phi_1} d\phi_1 \right) \sin \gamma \right] \\
 &\quad - 2\sqrt{\frac{B}{P}} \epsilon_1 \cos \phi_{1B} \cos \gamma
 \end{aligned} \tag{4.69}$$

$$X_{Q2} = \sqrt{\frac{B}{P}} \sqrt{\frac{2}{k_2}} \int_0^{\phi_{Q2}} \frac{1 - \sin^2 \phi_2}{\sqrt{1 - \epsilon_2^2 \sin^2 \phi_2}} d\phi_2 \tag{4.70}$$

$$Y_{Q2} = \sqrt{\frac{B}{P}} \sqrt{\frac{1}{k_2}} \left(\frac{2}{\epsilon_2^2} \right) \int_0^{\phi_{Q2}} \frac{2 \sin \phi_2 \cos \phi_2}{\sqrt{1 - \epsilon_2^2 \sin^2 \phi_2}} d\phi_2 \tag{4.71}$$

Sachant que :

- ϕ_{Q1} varie entre ϕ_{1B} et $\frac{\pi}{2}$
- ϕ_{Q2} varie entre 0 et ϕ_{2B}

Le calcul des intégrales s'effectue numériquement en appliquant la méthode des trapèzes sur 870 points.

4.2.3 Résultats et comparaisons avec l'expérience

Le modèle est appliqué aux tricots jersey en fibres de verre et de basalte. Les paramètres géométriques de la maille sont donnés dans le tableau 4.1. Ils correspondent à ceux des éprouvettes de traction colonne sur tricot sec. Ce choix a été fait en considérant que la présence du fil élastique dans les éprouvettes de traction rangée augmente les erreurs de mesure de la dimension des tricots. Pour la traction colonne avec évolution de la section de la mèche, le diamètre initial choisi est égal à la moitié de l'épaisseur mesurée du tricot et le diamètre final est celui d'une mèche avec un empilement hexagonal compact des filaments.

Nature de fibre	h_0	b_0	L_f	$d_m = d_{mf}$	d_{m0}	B
Verre	2,65 mm	4,35 mm	13,9 mm	0,58 mm	0,8 mm	0,31 N.mm ²
Basalte	2,65 mm	4,4 mm	13,1 mm	0,56 mm	0,73 mm	0,20 N.mm ²

Tableau 4.1 – Données d'entrée du modèle de comportement des tricots secs

4.2.3.1 Initialisation

L'initialisation permet de déterminer l'état d'équilibre de la maille au repos. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.2. Les valeurs des paramètres géométriques de la maille

calculées avec les paramètres α_0 , β_0 et γ_0 optimisés correspondent bien aux données d'entrée. L'augmentation du diamètre initial de la mèche a un impact sur les valeurs des angles et sur la valeur des efforts initiaux.

Verre ($d_m = 0,58$ mm)	α_0 69,5°	β_0 95,1°	γ_0 4,4°	h_0 2,65 mm	b_0 4,35 mm	L_f 13,9 mm
	S_{AB} 1,39 mm	S_{BC} 2,08 mm	P_0 0,15 N	P_{X0} 0,15 N	P_{Y0} 0,01 N	T_0 -0,02 N
Verre ($d_{m0} = 0,8$ mm)	α_0 62,1°	β_0 99,4°	γ_0 13,5°	h_0 2,65 mm	b_0 4,35 mm	L_f 13,9 mm
	S_{AB} 1,47 mm	S_{BC} 2,00 mm	P_0 0,23 N	P_{X0} 0,22 N	P_{Y0} 0,05 N	T_0 0,10 N
Basalte ($d_m = 0,56$ mm)	α_0 67,4°	β_0 102,6°	γ_0 20,0°	h_0 2,65 mm	b_0 4,40 mm	L_f 13,1 mm
	S_{AB} 1,44 mm	S_{BC} 1,84 mm	P_0 0,14 N	P_{X0} 0,14 N	P_{Y0} 0,04 N	T_0 0,05 N
Basalte ($d_{m0} = 0,73$ mm)	α_0 67,5°	β_0 102,6°	γ_0 34,8°	h_0 2,65 mm	b_0 4,40 mm	L_f 13,1 mm
	S_{AB} 1,53 mm	S_{BC} 1,75 mm	P_0 0,25 N	P_{X0} 0,20 N	P_{Y0} 0,14 N	T_0 0,20 N

Tableau 4.2 – Résultats de l'initialisation

Les coordonnées de l'ensemble des points de la fibre neutre de la maille sont déterminées avec la méthode décrite à la section 4.2.2.8. Les géométries de la maille au repos calculées avec un diamètre d_m et un diamètre d_{m0} sont représentées sur la figure 4.16 et comparées aux photos des éprouvettes de traction.

La forme de la maille obtenue avec le modèle est très proche de la forme réelle de la maille. Les différences observées sont attribuées aux erreurs de mesure des paramètres géométriques et au fait que les dimensions de la maille correspondent à la projection de la maille dans le plan, tandis que la longueur de fil, calculée à partir de la densité linéaire de la mèche, correspond à la longueur de fil réelle et non pas à la longueur projetée. Une augmentation du diamètre entraîne une augmentation de la courbure de la mèche.

4.2.3.2 Traction colonne

– Courbes de comportement :

Sur les figures 4.17 et 4.18 sont présentées les courbes expérimentales et théoriques de comportement des tricotés jersey en fibres de verre et de basalte. Cette figure met en évidence les limites du modèle qui n'est valide que pour de faibles efforts. La limite du modèle est atteinte pour une extension maximale de la maille par flexion de la mèche qui correspond au début de la courbure de la courbe expérimentale.

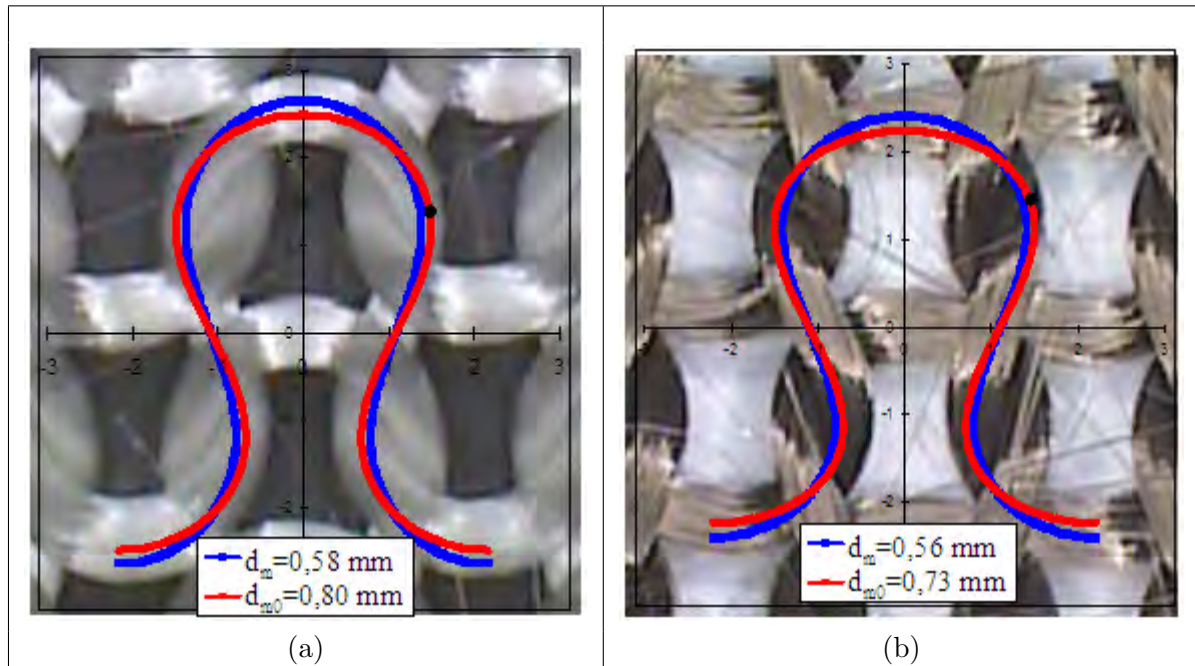


Figure 4.16 – Représentations géométriques des mailles au repos calculées avec un diamètre d_m et un diamètre d_{m0} d'un tricot jersey en (a) fibres de verre et (b) fibres de basalte

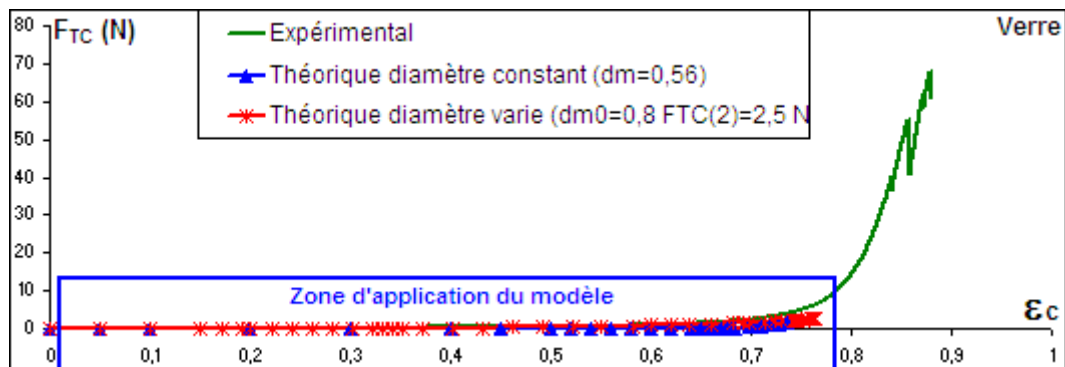


Figure 4.17 – Courbes expérimentales et théoriques de traction colonne des jersey en fibres de verre (Pleine échelle)

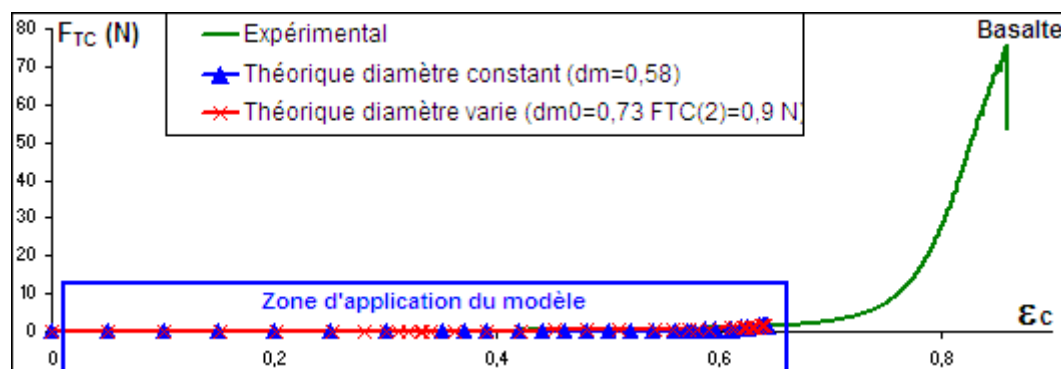


Figure 4.18 – Courbes expérimentale et théoriques de traction colonne des jersey en fibres de basalte (Pleine échelle)

La figure 4.19 présente les courbes de comportement des tricots jersey en fibres de verre et de basalte théoriques et expérimentales dans la zone de validité du modèle.

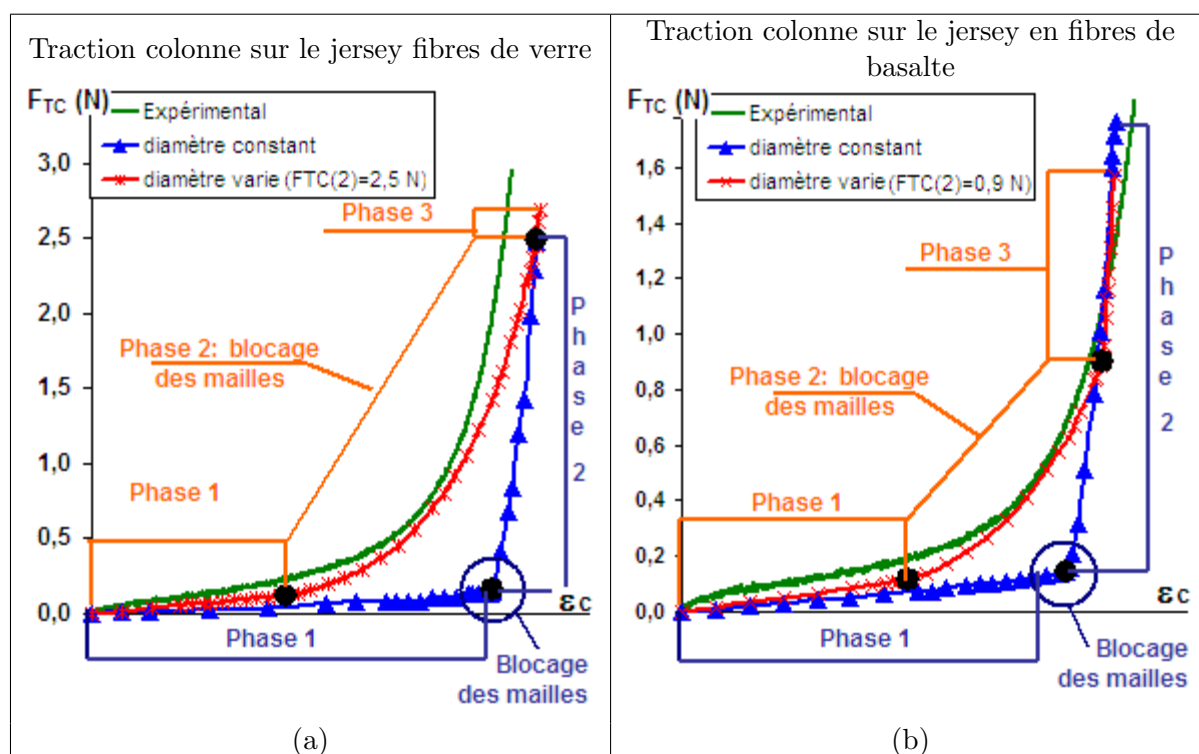


Figure 4.19 – Représentations des phases du comportement sur les courbes théoriques obtenues avec et sans évolution du diamètre du tricot jersey en (a) fibres de verre et (b) fibres de basalte

Les différentes phases observées sur les courbes théoriques correspondent aux étapes des modèles de traction colonne avec diamètre constant et diamètre variable. Dans les deux

modèles, la première étape effectuée en gardant le diamètre de mèche constant se traduit par un comportement linéaire dans lequel la déformation se produit uniquement par flexion de la mèche. Cette phase est également visible sur la courbe expérimentale. Les pentes des courbes sont données dans le tableau 4.3. La valeur déterminée expérimentalement est supérieure aux valeurs théoriques. Une augmentation du diamètre de mèche initial dans le modèle entraîne une augmentation de la pente. Malgré cela, les valeurs théoriques restent inférieures à la valeur expérimentale et l'erreur est relativement importante (40 % pour le verre et 15% pour le basalte). Ces différences s'expliquent par le choix de la valeur du diamètre initial qui est déterminée à partir de la mesure de l'épaisseur du tricot réalisée sous une pression de 0,005 MPa et ne correspond pas exactement à la valeur réelle. D'autre part, le frottement entre les mèches des mailles adjacentes ne sont pas pris en compte par le modèle.

Pente de la phase 1	modèle analytique avec d_m	modèle analytique avec d_{m0}	Expérimental
Verre	0,17	0,37	0,60
basalte	0,25	0,35	0,41

Tableau 4.3 – Pente de la phase 1 du comportement

En gardant un diamètre constant tout au long du calcul, le blocage des mailles se produit brutalement. En faisant évoluer ce diamètre, la phase de blocage est progressive et la déformation se produit par flexion et compression de la mèche. Les figures 4.20 et 4.21 présentent les résultats obtenus en faisant varier la valeur de $F_{TC}(2)$. Sur la figure 4.22 sont repérées les valeurs minimales et maximales entre lesquelles $F_{TC}(2)$ a été choisi sur la courbe expérimentale. La courbe théoriques obtenues sans variation du diamètre de mèche y est également représentées. À cette échelle, la courbe expérimentale présente une forte courbure et tend dans cet interval $[F_{TC}(2)_{min}, F_{TC}(2)_{max}]$ vers une courbe quasi linéaire de forte pente. Les valeurs ont été prises entre la fin de la courbure et juste au dessus du domaine d'application du modèle.

La courbure de la courbe théorique dépend de la valeur de l'effort $F_{TC}(2)$ retenue. La déformation au blocage définitif des mailles ne dépend que de la valeur du diamètre final et l'ensemble des courbes théoriques se confondent dans la dernière phase du comportement. En diminuant la valeur de d_{mf} , le blocage définitif se produit plus tardivement et se rapproche de la valeur de déformation critique ϵ_C déterminée expérimentalement (Figure 4.23). Quelles que soient les valeurs du diamètre final ou de l'effort $F_{TC}(2)$ choisies, le modèle atteint sa limite pour une même valeur de l'effort de traction. L'extension maximale de la maille par flexion de la mèche est atteinte, et la déformation du tricot se produit ensuite essentiellement par compression de la mèche avant la reprise d'effort par les fibres.

Le calcul de la largeur de maille pour chaque niveau de déformation permet de tracer la déformation rangée en fonction de la déformation colonne (Figure 4.24). En partant d'un diamètre initial identique, quelles que soient les valeurs du diamètre final et de l'effort final de blocage des mailles, le rapport des déformation est identique. La configuration de la maille, à un niveau de déformation donné, reste identique et la forme de la maille déformée dépend de la configuration initiale de celle-ci.

– Représentation de la maille :

La figure 4.25 représente la maille du tricot jersey en fibres de verre et de basalte, pour différents niveaux de déformation, obtenue par le modèle de traction colonne avec évolution du diamètre de mèche. Sur chaque graphique sont représentées la maille au repos, la maille

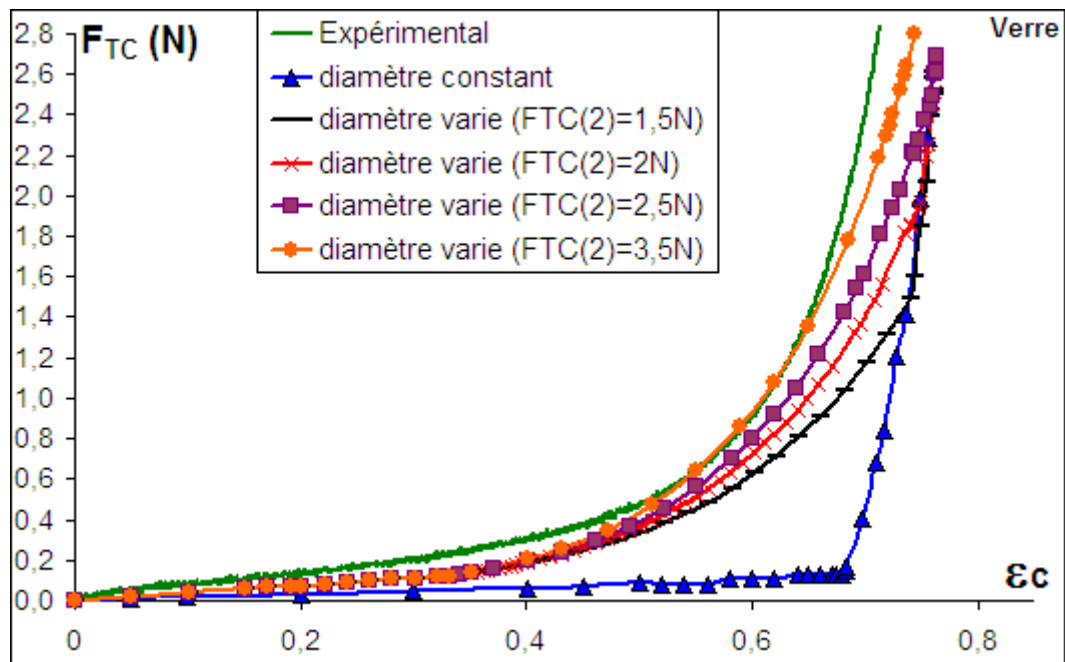


Figure 4.20 – Courbes expérimentales et théoriques de comportement du jersey en fibres de verre

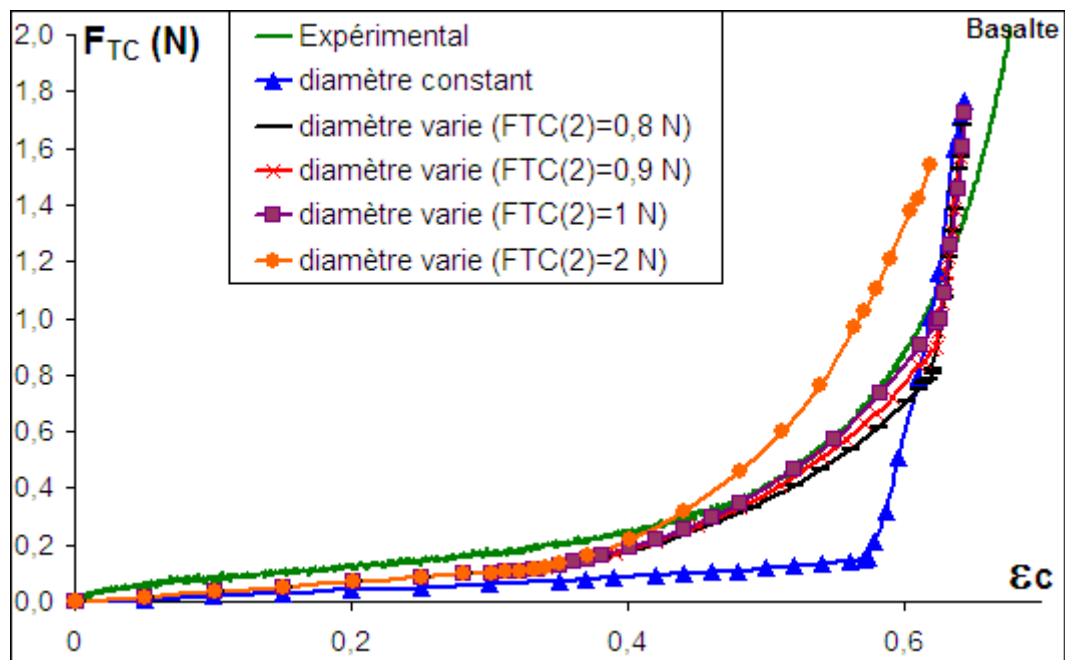


Figure 4.21 – Courbes expérimentales et théoriques de comportement du jersey en fibres de basalte

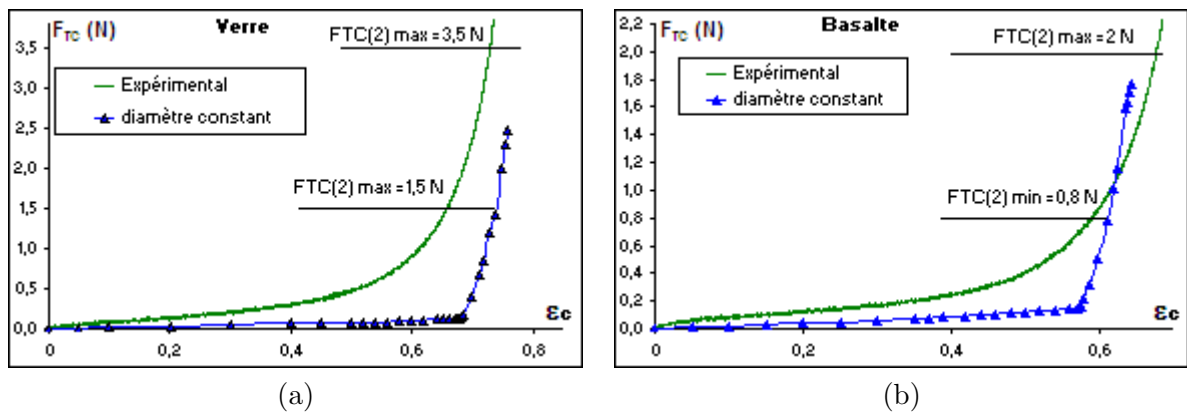


Figure 4.22 – Représentations des valeurs minimales et maximales de $F_{TC}(2)$ choisies pour la traction colonne sur le jersey en (a) fibres de verre et (b) fibres de basalte

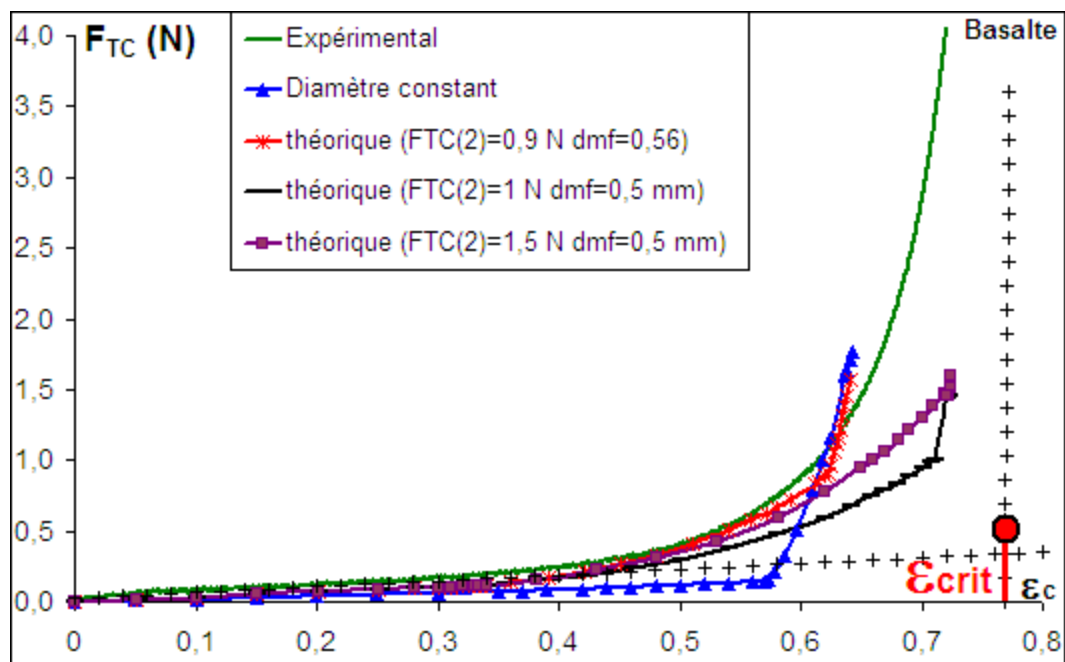


Figure 4.23 – Courbes expérimentales et théoriques de comportement du jersey en fibres de basalte

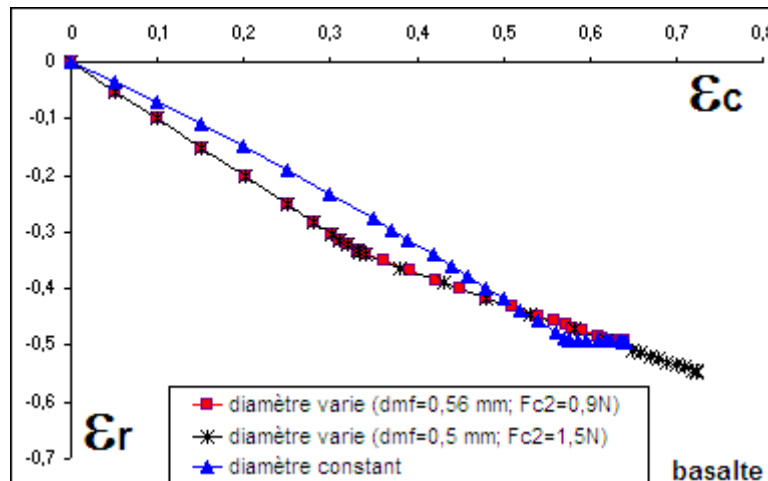


Figure 4.24 – Représentation de la déformation rangée en fonction de la déformation colonne

déformée ainsi que la position du point B. La première image correspond à un niveau de déformation de la première phase du comportement, la seconde correspond à un niveau de déformation de la phase de blocage des mailles et la dernière image correspond à la déformation maximale calculée par le modèle.

La position du point B évolue et la longueur S_{BC} diminue avec la déformation, ce qui montre que le modèle prend en compte le glissement entre les mailles adjacentes. La forme de la maille calculée au dernier niveau de déformation est totalement allongée et les jambes des mailles sont totalement tendues. Le modèle atteint sa limite lorsque la déformation structurale maximale est atteinte.

4.2.3.3 Traction rangée

– Courbes de comportement :

Sur les figures 4.26 et 4.27 sont présentées les courbes expérimentales et théoriques de comportement des tricots jersey en fibres de verre et de basalte. Ces figures mettent en évidence les limites du modèle qui n'est valide que sur une première partie de la phase de déformation structurale du tricot.

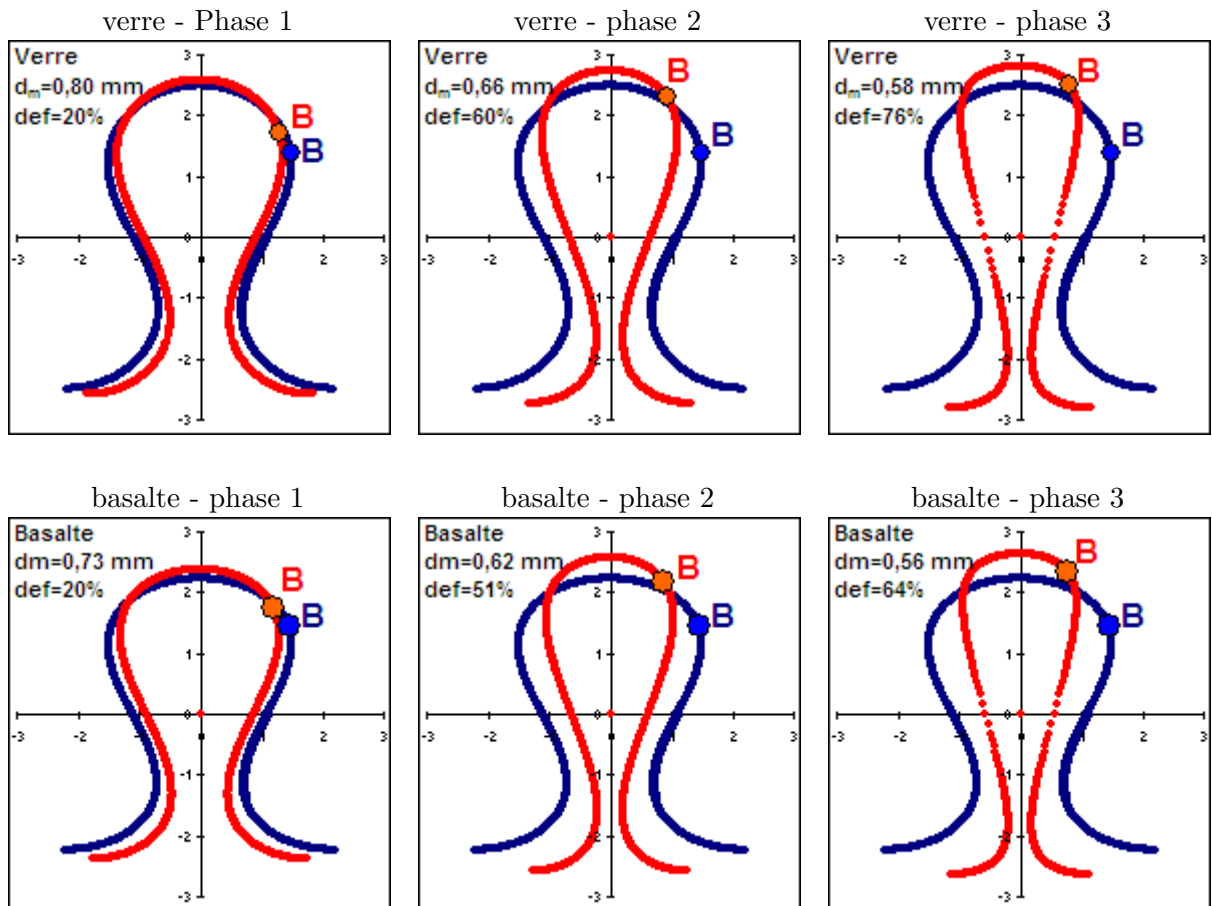


Figure 4.25 — Représentations de la maille de jersey en fibres de verre et de basalte pour différents niveaux de déformation colonne

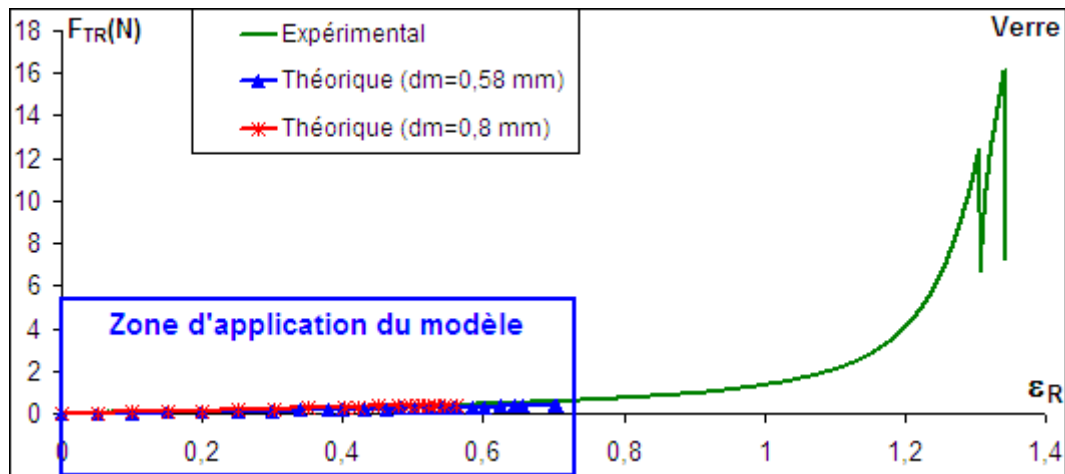


Figure 4.26 – Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de verre (Pleine échelle)

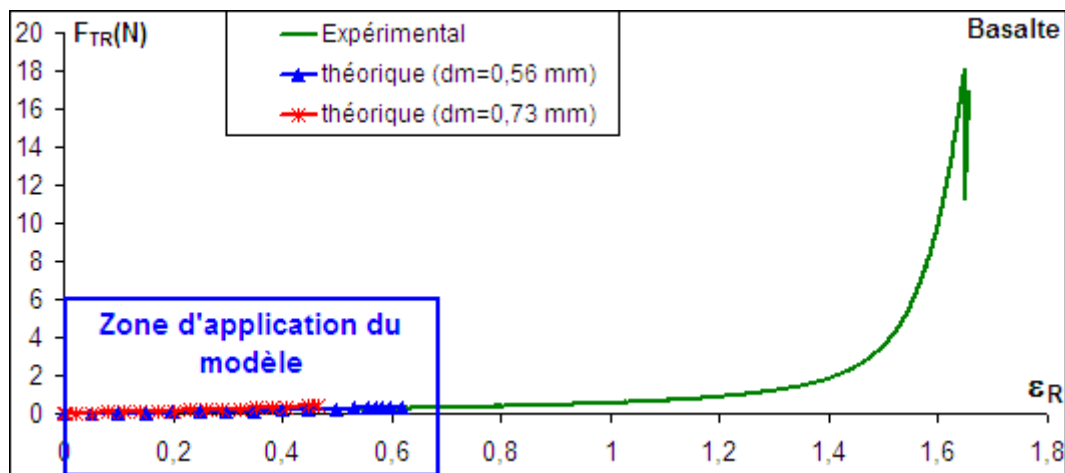


Figure 4.27 – Courbes expérimentale et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de basalte (Pleine échelle)

Les figures 4.28 4.29 présentent les courbes expérimentales et théoriques de comportement des tricotés jersey en fibres de verre et de basalte dans la zone de validité du modèle. Le modèle a été appliqué en considérant une mèche avec un arrangement compact puis espacé des filaments.

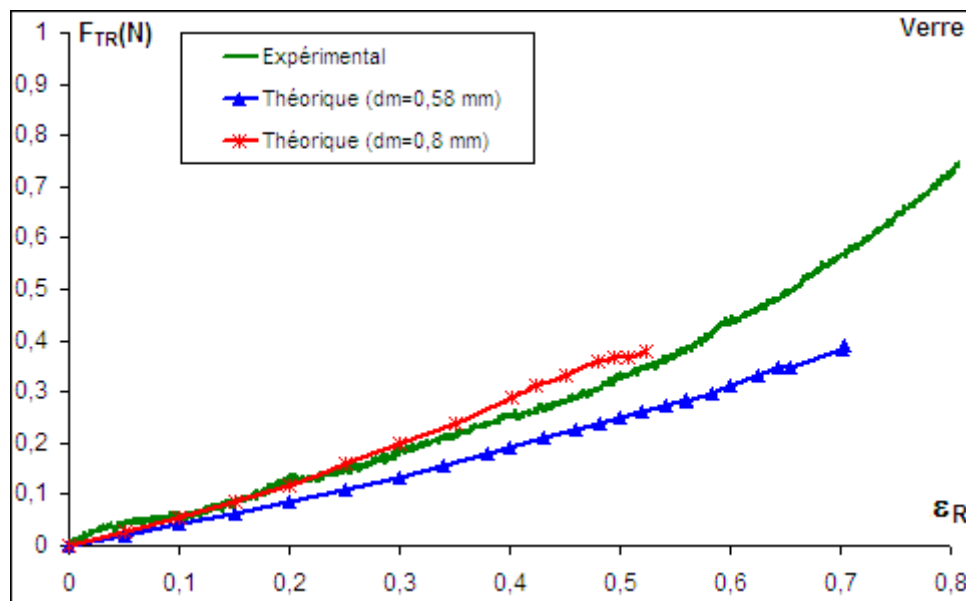


Figure 4.28 – Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de verre dans la zone de validité du modèle

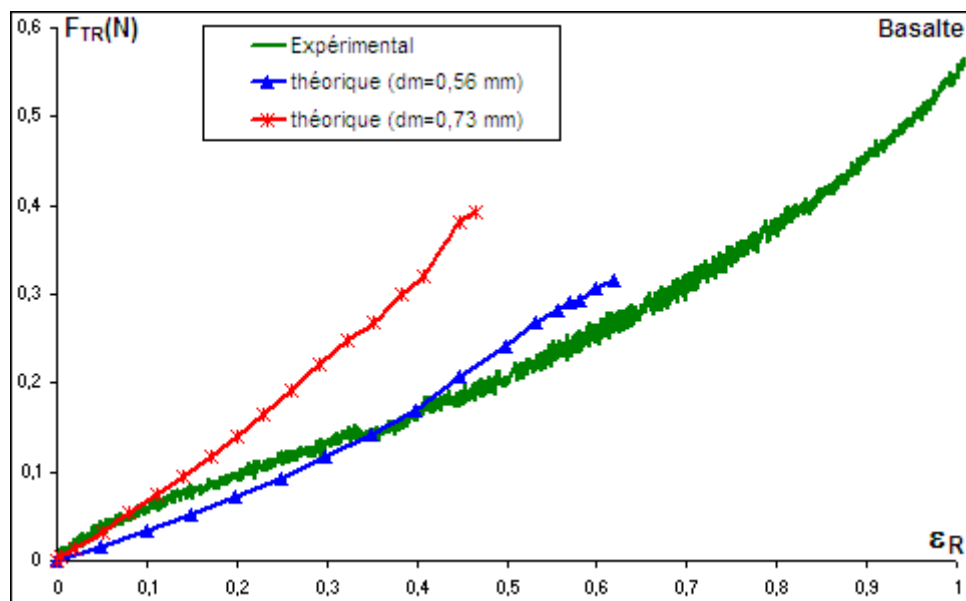


Figure 4.29 – Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de basalte dans la zone de validité du modèle

Les courbes théoriques décrivent un comportement linéaire identique à la première phase de la traction colonne. La zone de validité du modèle correspond au domaine linéaire des courbes expérimentales. Les valeurs des pentes de la courbe sont données dans le tableau 4.4.

En comparant les valeurs théoriques et expérimentales, une meilleure estimation est obtenue avec un arrangement de fibres espacé dans la mèche pour le verre et compacte pour le basalte. L'estimation est meilleure que pour la traction colonne. Une erreur de 10 % est obtenue pour les meilleures estimations. Le comportement théorique est proche du comportement expérimental, cependant il est difficile de comparer quantitativement les résultats théoriques avec l'expérience étant donné que les paramètres géométriques d'entrée correspondent aux valeurs mesurées sur les éprouvettes de traction colonne. Néanmoins, ces résultats permettent de valider le modèle pour l'estimation de la configuration de la maille. Le modèle ne prend pas en compte la modification de la section de la mèche, ce qui explique que le modèle est valide jusqu'à des niveaux de déformation relativement faibles en comparaison avec les niveaux atteints expérimentalement.

	modèle avec d_m	modèle avec d_{m0}	Expérimental
Verre	0,55	0,77	0,70
basalte	0,40	0,77	0,36

Tableau 4.4 – *Pentes de la courbe de comportement de traction rangée*

– Représentation de la maille :

La figure 4.30 représente la maille du tricot jersey en fibre de verres et de basalte à différents niveaux de déformation rangée. Sur chaque graphique sont représentées la maille au repos, la maille déformée ainsi que la position du point B. La dernière image représente la géométrie de la maille à la déformation maximale calculée par le modèle.

La position du point B évolue et la longueur S_{BC} augmente avec la déformation. Au dernier niveau de déformation, la tête de la maille est tendue, ce qui permet de conclure sur une bonne estimation de la déformation maximale de la maille dans le cas où la mèche est incompressible.

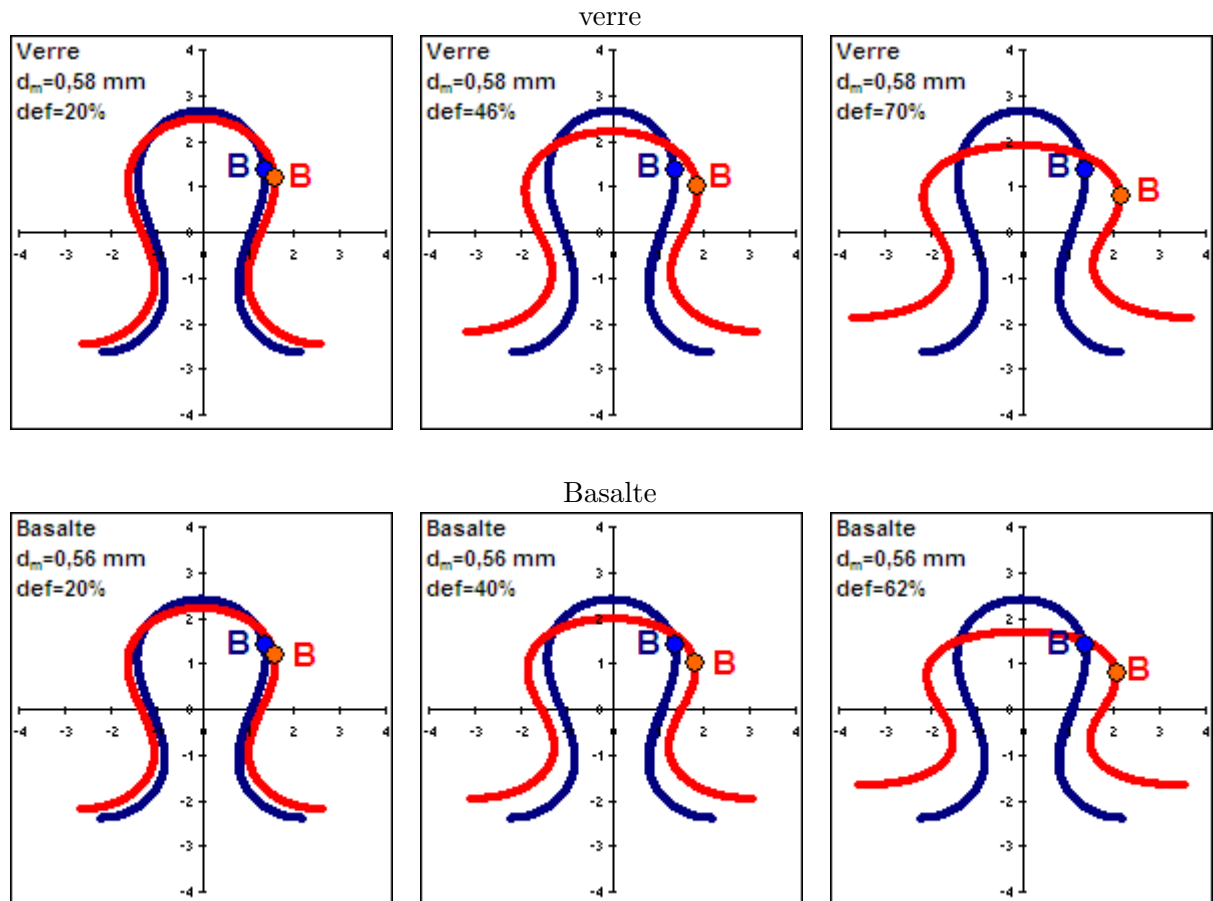


Figure 4.30 — Représentations de la maille de jersey en fibres de verre et de basalte pour différents niveaux de déformation rangée

4.3 Modélisation des propriétés élastiques d'un composite à renfort tricoté

Le modèle proposé a pour objectif d'estimer les propriétés élastiques d'un matériau composite à renfort tricoté de texture jersey et jersey chargé. Il est basé sur les travaux de Ramakrishna et al. ([12, 52, 53, 81]). Le principe d'homogénéisation est utilisé pour estimer les constantes élastiques effectives du matériau en fonction de la géométrie du renfort. Un volume élémentaire représentatif (VER) de l'ensemble du matériau est préalablement définie et l'orientation des fibres dans le VER est déterminée par un modèle géométrique issu du modèle de déformation des mailles (cf. section 4.2.2.8). La projection dans le plan du VER appelée CER. La notion de volume est introduite par les taux volumiques.

4.3.1 Cellule élémentaire représentative et modélisation géométrique du renfort

4.3.1.1 Cas du composite à renfort jersey simple :

La CER est le plus petit élément permettant de décrire l'orientation des fibres dans l'ensemble du matériau, elle dépend donc de la direction de sollicitation. Elle est définie en considérant toutes les mailles du renfort identiques. La cellule unitaire comprend une maille de tricot (Figure 4.31). Pour une sollicitation dans les directions principales du renfort (0° et 90°), la cellule unitaire est subdivisée en quatre CER de surface $(h \times b)/2$ comprenant deux quarts de maille. Pour les sollicitations dans les autres directions, la cellule unitaire est subdivisée en deux CER de surface $(h \times b)$ comprenant quatre quarts de maille. Deux zones sont distinguées dans la CER : une zone riche en fibres qui correspond aux deux mèches imprégnées de résine et une zone de résine pure (Figure 4.32).

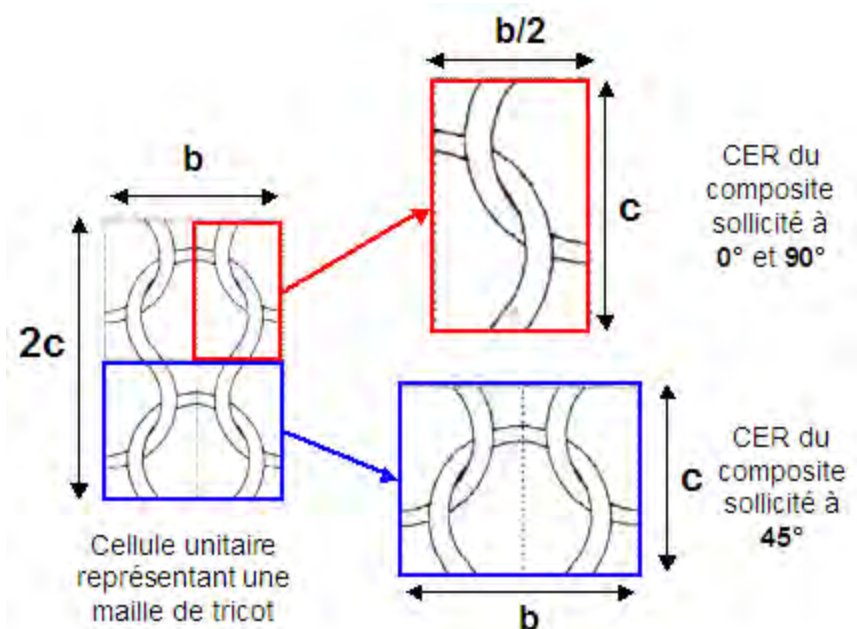


Figure 4.31 — CER des composites à renfort jersey sollicités à 0° , 90° et 45°

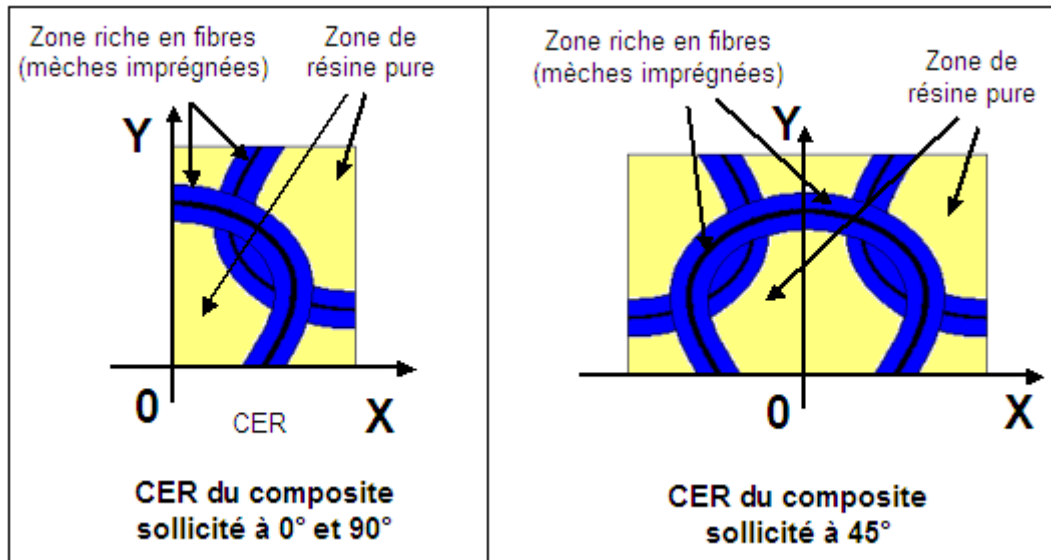


Figure 4.32 – Représentation des deux zones comprises dans la CER du composite

L'orientation des fibres dans la CER est définie par un modèle géométrique. Ramakrishna et al. utilisent le modèle de Leaf et Glaskin [51] qui permet d'obtenir une orientation tridimensionnelle des fibres. Dans cette étude, le choix s'est porté sur la géométrie de la maille calculée avec le modèle de comportement des tricotés secs simples. Ce modèle ne donne qu'une orientation bidimensionnelle de la maille mais possède l'avantage de décrire de manière précise la forme de la maille à partir de ses paramètres géométriques et de permettre la prise en compte d'une prétension du renfort avant mise en œuvre.

4.3.1.2 Cas du composite à renfort jersey chargé :

La CER du composite renforcé de jersey chargé correspond à la CER du tricot qui est le plus petit élément répété permettant de décrire l'ensemble du tricot. Dans cette étude, le modèle est appliqué aux composites étudiés expérimentalement. Les CER des contextures JC1, JC2 et JC3 sont rappelées dans les diagrammes techniques de la figure 4.33 et leurs dimensions correspondent à la hauteur d'une maille et à la largeur de quatre mailles.

L'orientation des fibres de la base jersey du tricot correspond à la géométrie de la maille calculée avec le modèle de comportement des tricotés secs simples. L'orientation des mèches insérées est obtenue en établissant un modèle géométrique à partir des caractéristiques du tricot. Ces caractéristiques sont les dimensions des mailles jersey, le nombre de mailles sur lesquelles le fil est flotté ainsi que la longueur de la mèche insérée. La mèche est divisée en deux parties : la première correspond au flotté (dans le cas présent sur 3 mailles) et la seconde à la charge (sur une maille). En prenant comme hypothèse que la courbure des mèches est de forme sinusoïdale, les équations de la fibre neutre sont déterminées en définissant des points caractéristiques dont les coordonnées sont reliées aux caractéristiques du tricot. La figure 4.34 présente la photo d'un tricot JC1 en fibres de verre sur laquelle les points caractéristiques des mèches sont représentés.

- Les points 1 et 3 correspondent aux extrémités du flotté,
- Le point 2 correspond au milieu du flotté,

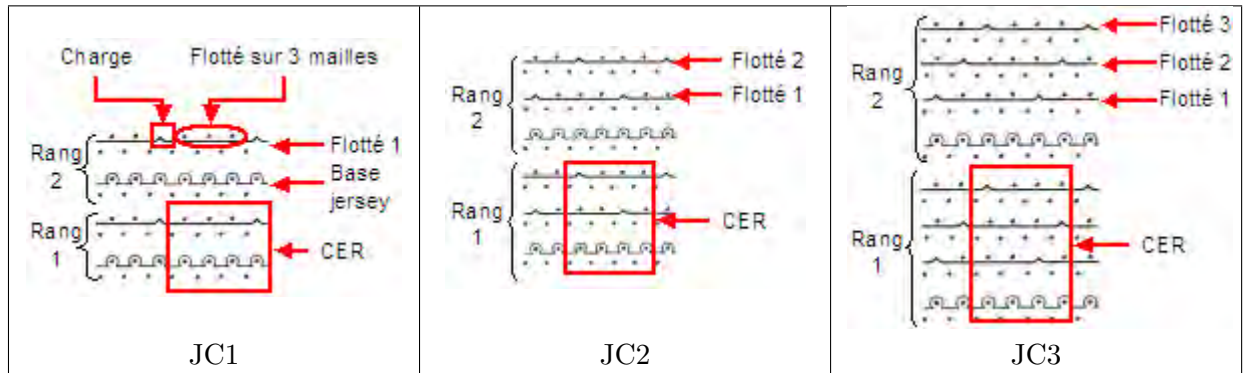


Figure 4.33 – Diagrammes techniques des contextures jersey chargées

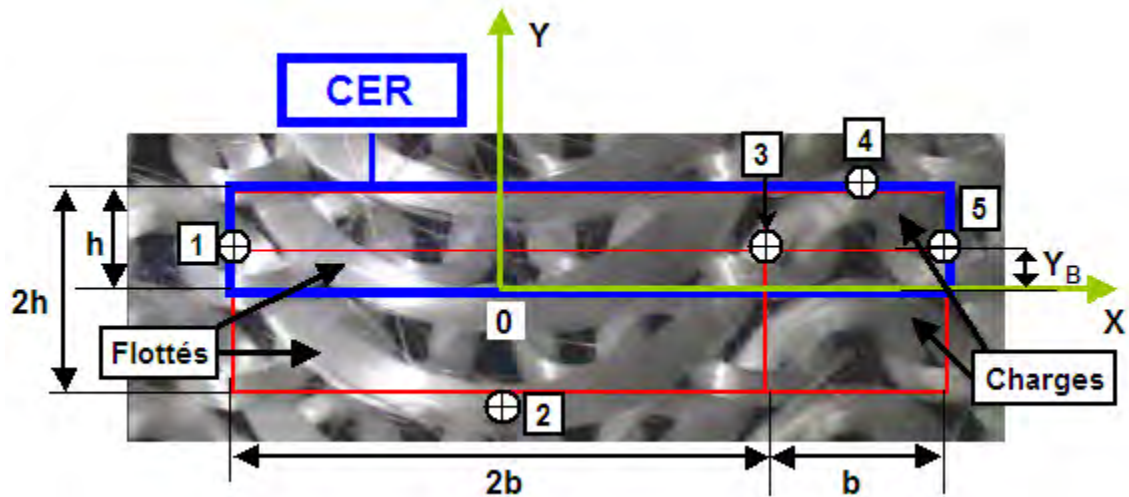


Figure 4.34 – Photo d'un tricot JC1 en fibres de verre et représentation de la CER

- Les points 3 et 5 correspondent aux extrémités de la charge,
- Le point 4 correspond au milieu de la charge,
- Le point 3 correspond à la limite entre le flotté et la charge.

En se plaçant dans le repère OXY, qui correspond au repère de la CER de la maille jersey simple, les coordonnées des points caractéristiques sont déterminées :

- Point 1 : $\left(-\frac{3b}{2}, Y_B\right)$
- Point 2 : $(0, Y_F(min))$
- Point 3 : $\left(\frac{3b}{2}, Y_B\right)$
- Point 4 : $(2b, Y_C(max))$
- Point 5 : $\left(\frac{5b}{2}, Y_B\right)$

Les ordonnées des extrémités des portions de flotté (points 1 et 3) et de charge (points 3

et 5) sont estimées égales à Y_B et leurs abscisses se situent entre deux colonnes de mailles à égale distance de chacune d'elles. $Y_F(min)$ et $Y_C(max)$ sont respectivement les ordonnées du milieu du flotté (point 2) et du milieu de la charge (point 4). Les coordonnées de ces points permettent de définir les équations de la fibre neutre du flotté $Y_F(X_F)$ et de la charge $Y_C(X_C)$:

$$Y_F(X_F) = -A_F \sin\left(\frac{\pi}{3b}X_F + \frac{\pi}{2}\right) + Y_B \quad (4.72)$$

$$X_F \in \left[-\frac{3b}{2}; \frac{3b}{2}\right]$$

$$Y_C(X_C) = A_C \sin\left(\frac{\pi}{b}X_C + \frac{\pi}{2}\right) + Y_B \quad (4.73)$$

$$X_C \in \left[\frac{3b}{2}; \frac{5b}{2}\right]$$

Avec :

$$A_F = -Y_F(min) + Y_B \quad (4.74)$$

$$A_C = Y_C(max) - Y_B \quad (4.75)$$

Les valeurs de $Y_F(min)$ et $Y_C(max)$ n'étant pas connues, A_F et A_C sont déterminées numériquement à partir de la longueur de la mèche insérée. Dans le chapitre 3, la longueur de mèche a été définie égale à 130 % la largeur du tricot (Tableau 3.3). La longueur de la mèche L_{FC} est donc définie par :

$$L_{FC} = L_F + L_C = 1,3 \times 4b \quad (4.76)$$

L_F et L_C sont respectivement les longueurs du flotté et de la charge et sont définies par les équations suivantes :

$$L_F = \int_{pt1}^{pt3} \sqrt{dX_F^2 + dY_F^2} \quad (4.77)$$

$$L_C = \int_{pt3}^{pt5} \sqrt{dX_C^2 + dY_F^2} \quad (4.78)$$

En procédant à une discrétisation sur 400 points, les longueurs sont approchées par :

$$L_F \simeq \sum_{i=1}^{n_F} \sqrt{(X_{Fi} - X_{Fi-1})^2 + (Y_{Fi} - Y_{Fi-1})^2} \quad (4.79)$$

$$\text{Avec } X_{Fi} = X_{F0} + i \frac{X_{Fn_F} - X_{F0}}{n_F} \quad ; \quad X_{F0} = -\frac{3b}{2} \quad ; \quad X_{Fn_F} = \frac{3b}{2}$$

$$\text{Et } Y_{Fi} = -A_F \sin\left(\frac{\pi}{3b}X_{Fi} + \frac{\pi}{2}\right) + Y_B$$

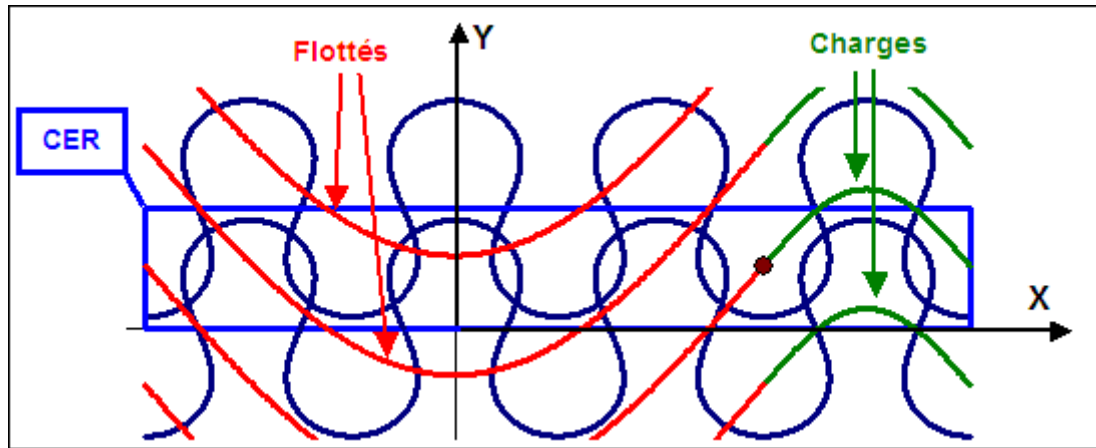


Figure 4.35 – Représentation graphique de la contexture JC1 obtenue avec les modèles géométriques

$$L_C \simeq \sum_{i=1}^{n_C} \sqrt{(X_{Ci} - X_{Ci-1})^2 + (Y_{Ci} - Y_{Ci-1})^2} \quad (4.80)$$

$$\text{Avec } X_{Ci} = X_{C0} + i \frac{X_{Cn_C} - X_{C0}}{n_C} \quad ; \quad X_{C0} = -\frac{3b}{2} \quad ; \quad X_{Cn_C} = \frac{3b}{2}$$

$$\text{Et } Y_{Ci} = A_C \sin \left(\frac{\pi}{b} X_{Ci} + \frac{\pi}{2} \right) + Y_B$$

Avant de procéder à la détermination de A_F et A_C , une relation de continuité est définie par l'égalité des pentes de la tangente au point 3 du flotté et de la charge :

$$\frac{dY_F}{dX_F} \left(\frac{3b}{2} \right) = \frac{dY_C}{dX_C} \left(\frac{3b}{2} \right) \quad (4.81)$$

Ce qui amène à :

$$A_C = \frac{A_F}{3} \quad (4.82)$$

A_F est déterminé numériquement en procédant à une boucle d'optimisation qui consiste à minimiser la fonction objectif 4.83 par un algorithme de Quasi-Newton :

$$f_{obj} = ((L_C + L_F) - 1, 3 \times 4b)^2 \quad (4.83)$$

L_C et L_F sont données dans les équations 4.79 et 4.80. La représentation graphique du tricot JC1 obtenue avec les modèles géométriques est donnée à la figure 4.35. Les mèches insérées dans les rangées supérieures et inférieures sont obtenues par une translation de $Y' = Y + kh$.

La figure 4.36 compare la forme de la mèche flottée calculée avec le tricot JC1 en fibres de verre en superposant les CER. Le modèle donne une bonne prédiction de la forme de la mèche insérée. Le point minimal calculé se situe plus bas que celui du tricot. L'erreur est attribuée au fait que le modèle tient compte de la longueur réelle de la mèche et non projetée dans le

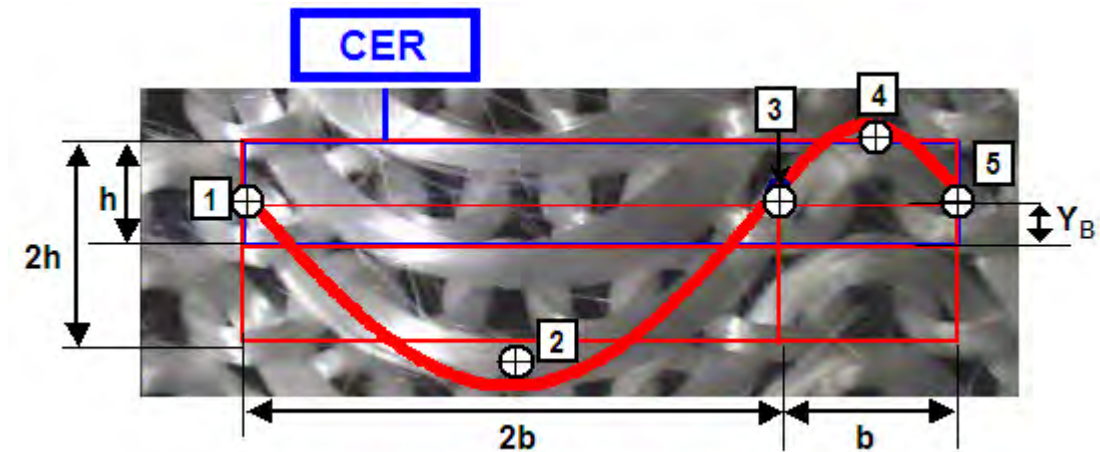


Figure 4.36 – Représentation graphique de la mèche insérée et comparaison avec le tricot

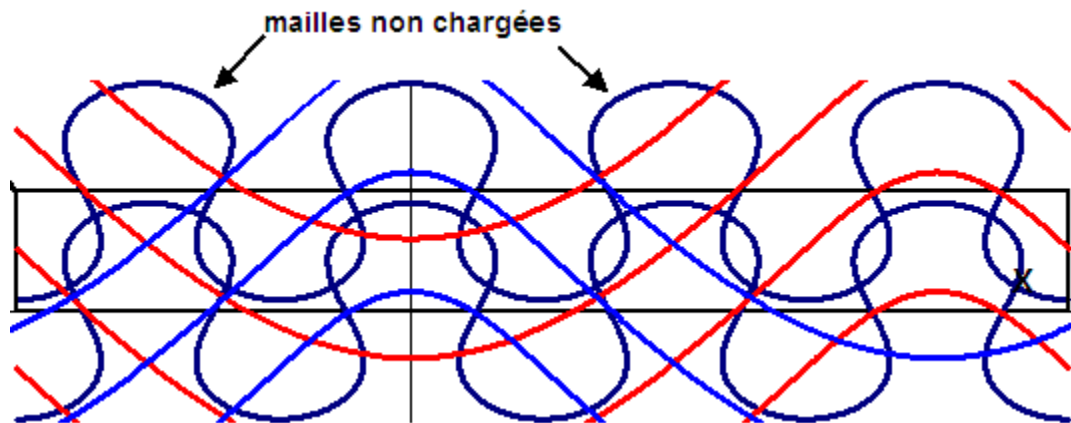


Figure 4.37 – Représentation graphique de la texture JC2 obtenue avec les modèles géométriques

plan. La forme des mèches insérées dans les contextures JC2 et JC3 est considérée identique à celle des JC1. Leur représentation graphique est donnée aux figures 4.37 et 4.38.

4.3.2 Modèle analytique pour l'estimation des propriétés élastiques

La procédure analytique est réalisée en considérant que la CER est composée de deux zones : une zone riche en fibres qui correspond aux mèches de fibres imprégnées de résine et une zone de résine pure. La démarche adoptée se déroule en deux étapes successives. Dans la première étape, seules les mèches imprégnées sont considérées. Cette étape consiste à déterminer les modules élastiques équivalents de chacune des mèches imprégnées présentes dans la CER en les considérant comme des matériaux composites composés de fibres et de résine. La deuxième étape consiste à estimer les propriétés élastiques de la CER considérée comme étant un matériau composite composé des mèches imprégnées et de la résine pure. Dans cette phase, les mèches sont assimilées à un matériau homogène dont les caractéristiques

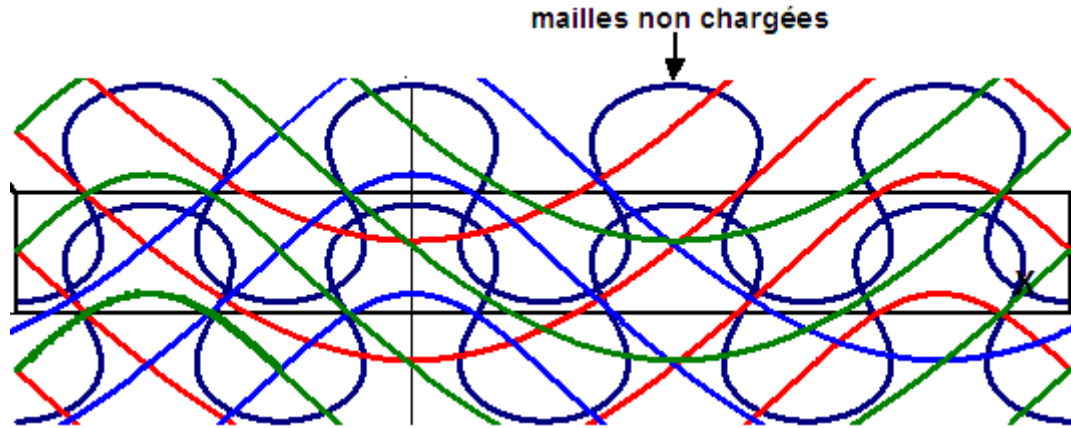


Figure 4.38 – Représentation graphique de la contexture JC3 obtenue avec les modèles géométriques

mécaniques correspondent aux modules équivalents déterminés dans la première étape.

4.3.2.1 Estimation des propriétés élastiques d'une mèche de fibres imprégnées :

L'estimation des propriétés élastiques d'une mèche de fibres imprégnées est basée sur le principe d'homogénéisation qui consiste à déterminer les propriétés élastiques d'un matériau composite unidirectionnel. Pour l'appliquer à la mèche courbée, il est nécessaire de la discrétiser en n éléments assimilés à des UD orientés d'un angle ψ_{di} avec la direction de sollicitation X_d ($d = (0, 45, 90)$ selon la direction de sollicitation). Sur la figure 4.39, l'exemple est donné pour une mèche de la CER de la maille jersey sollicité à 0° ou 90° . La même méthode est appliquée pour chacune des mèches que comporte la CER. Les discrétisations ont déjà été effectuées dans le modèle de comportement des tricots secs pour le jersey et dans le modèle géométrique des mèches flottées. À chaque élément i est associé un repère local $(Q_i, 1, 2)$ dont la direction de l'axe 1 coïncide avec la direction de la fibre neutre de la mèche. Les propriétés élastiques équivalentes de chaque élément UD sont calculées dans le repère local en appliquant un modèle d'homogénéisation.

Le concept d'homogénéisation a été expliqué dans le chapitre 1. Les modèles d'homogénéisation généralement utilisés dans les modèles appliqués aux composites à renforts tricotés sont la loi des mélanges, le modèle de Chamis ou le modèle de Uemura. Ces différents modèles ont été présentés dans la section 1.6.2.3. Ils permettent d'estimer les constantes élastiques d'un composite UD dans ses directions principales à partir des propriétés élastiques de chacun des composants et du taux de fibres :

$$E_{11}(i) = f(V_{fm}, E_f, E_m) \quad (4.84)$$

$$\nu_{12}(i) = f(V_{fm}, \nu_f, \nu_m) \quad (4.85)$$

$$E_{22}(i) = f(V_{fm}, E_f, E_m) \quad (4.86)$$

$$G_{12}(i) = f(V_{fm}, G_f, \nu_f, G_m, \nu_m) \quad (4.87)$$

V_{fm} correspond au taux volumique de fibres dans la mèche imprégnée. Celui-ci est déterminé par une analyse d'images réalisée sur des clichés MEBE d'échantillons de composite à renfort

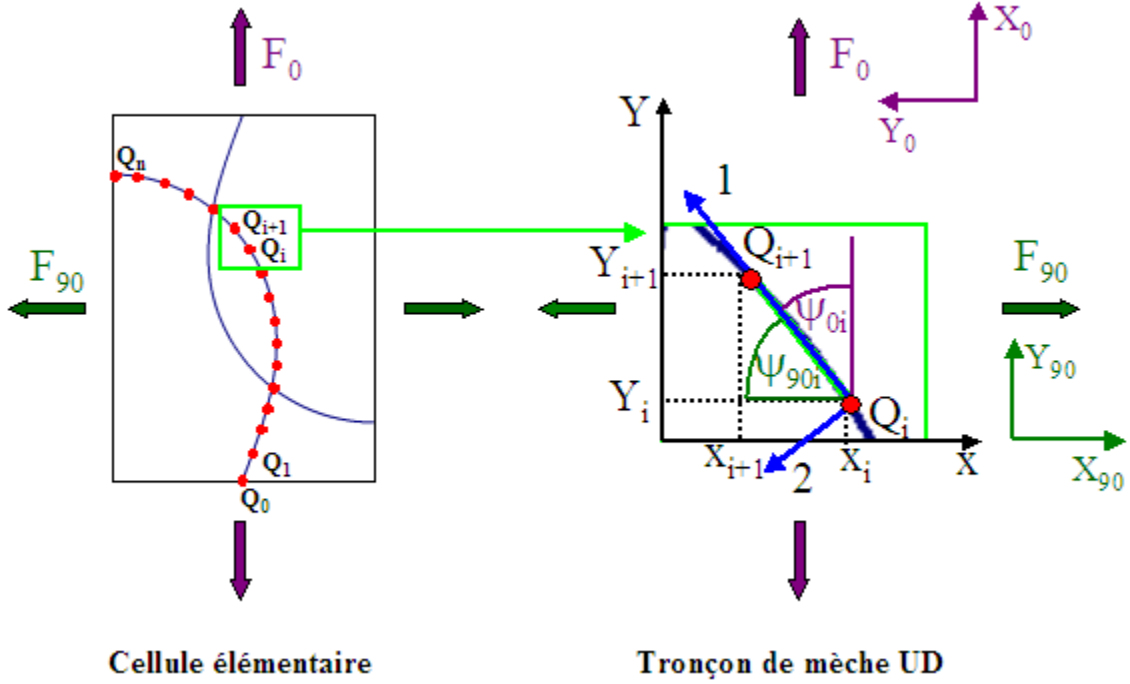


Figure 4.39 – Discretisation de la mèche courbée

jersey en fibres de verre et de basalte (Figure 4.40). Les taux volumiques moyens obtenus à partir de plusieurs clichés de même agrandissement sont respectivement de $0,71 \pm 0,02$ pour le verre (sur 6 images) et de $0,65 \pm 0,03$ pour le basalte (sur 9 images).

E_{11} , ν_{12} , E_{22} et G_{12} sont les constantes élastiques équivalentes de l'UD dans ses directions principales. Les propriétés élastiques effectives de chaque élément d'UD dans le repère associé à la direction de sollicitation sont déterminées en procédant à un changement de base :

$$\frac{1}{E_{X_d}(\psi_{di})} = \frac{\cos^4 \psi_{di}}{E_{11}} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 \psi_{di} \cos^2 \psi_{di} + \frac{\sin^4 \psi_{di}}{E_{22}} \quad (4.88)$$

$$\frac{1}{E_{Y_d}(\psi_{di})} = \frac{\sin^4 \psi_{di}}{E_{11}} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 \psi_{di} \cos^2 \psi_{di} + \frac{\cos^4 \psi_{di}}{E_{22}} \quad (4.89)$$

$$\nu_{X_d Y_d}(\psi_{di}) = E_{X_d}(\psi_{di}) \frac{\nu_{12}}{E_{11}} (\sin^4 \psi_{di} + \cos^4 \psi_{di}) \quad (4.90)$$

$$\begin{aligned} & -E_{X_d}(\psi_{di}) \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 \psi_{di} \cos^2 \psi_{di} \\ \frac{1}{G_{X_d Y_d}(\psi_{di})} &= 2 \left(\frac{2}{E_{11}} + \frac{2}{E_{22}} + \frac{4\nu_{12}}{E_{11}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 \psi_{di} \cos^2 \psi_{di} \\ & + \frac{1}{G_{12}} (\sin^4 \psi_{di} + \cos^4 \psi_{di}) \end{aligned} \quad (4.91)$$

Les constantes élastiques apparentes de l'ensemble de la mèche de fibres imprégnées de longueur L sont déterminées en prenant pour hypothèse que tous les éléments UD sont soumis à la même condition de déformation :

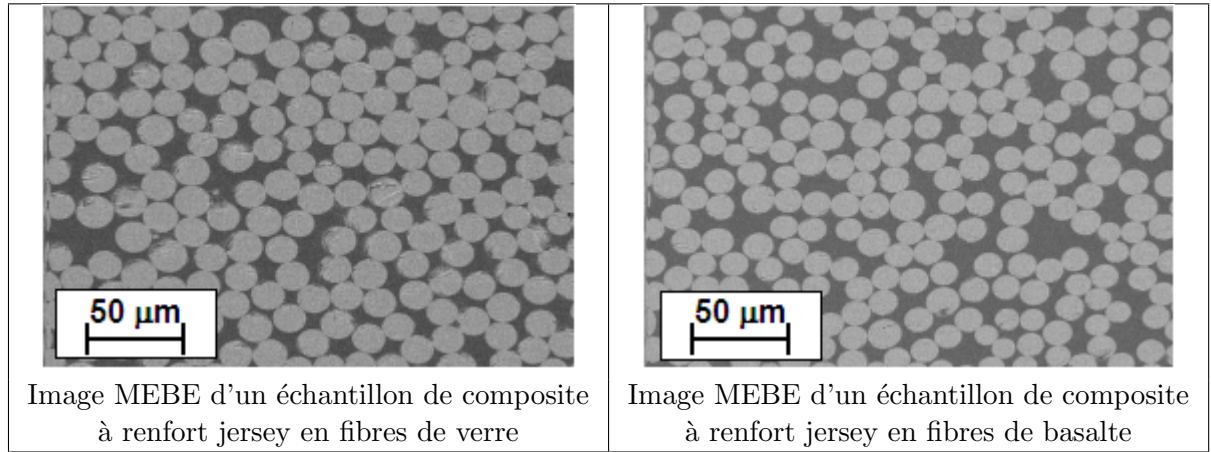


Figure 4.40 – Images MEBE d'échantillons de composite à renfort jersey en fibres de verre et en fibres de basalte pour la détermination du taux de fibres dans la mèche par analyse d'image

$$\bar{E}_{X_d} = \frac{1}{L} \int_0^L E_{X_d}(\psi_{di}) dx \simeq \frac{1}{L} \sum_1^n a_i E_{X_d}(\psi_{di}) \quad (4.92)$$

$$\bar{E}_{Y_d} = \frac{1}{L} \int_0^L E_{Y_d}(\psi_{di}) dx \simeq \frac{1}{L} \sum_1^n a_i E_{Y_d}(\psi_{di}) \quad (4.93)$$

$$\bar{\nu}_{X_d Y_d} = \frac{1}{L} \int_0^L \nu_{X_d Y_d}(\psi_{di}) dx \simeq \frac{1}{L} \sum_1^n a_i \nu_{X_d Y_d}(\psi_{di}) \quad (4.94)$$

$$\bar{G}_{X_d Y_d} = \frac{1}{L} \int_0^L G_{X_d Y_d}(\psi_{di}) dx \simeq \frac{1}{L} \sum_1^n a_i G_{X_d Y_d}(\psi_{di}) \quad (4.95)$$

$$\bar{\nu}_{Y_d X_d} = \bar{\nu}_{X_d Y_d} \frac{\bar{E}_{Y_d}}{\bar{E}_{X_d}} \quad (4.96)$$

La matrice de rigidité d'une mèche courbée est obtenue à partir de ses constantes élastiques :

$$\bar{C}_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{E}_{X_d}}{1 - \bar{\nu}_{X_d Y_d} \bar{\nu}_{Y_d X_d}} & \frac{\bar{\nu}_{Y_d X_d} \bar{E}_{X_d}}{1 - \bar{\nu}_{X_d Y_d} \bar{\nu}_{Y_d X_d}} & 0 \\ \frac{\bar{\nu}_{Y_d X_d} \bar{E}_{X_d}}{1 - \bar{\nu}_{X_d Y_d} \bar{\nu}_{Y_d X_d}} & \frac{\bar{E}_{Y_d}}{1 - \bar{\nu}_{X_d Y_d} \bar{\nu}_{Y_d X_d}} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{G}_{X_d Y_d} \end{bmatrix} \quad (4.97)$$

La matrice de rigidité \bar{C}_{ij} caractérise le comportement élastique d'une seule mèche. L'ensemble de la procédure décrite précédemment est effectuée pour chacune des mèches qui composent la CER afin de déterminer les propriétés élastiques apparentes de la combinaison de l'ensemble des mèches.

4.3.2.2 Estimation des propriétés élastique de la combinaison de l'ensemble des mèches présentent dans la CER

La procédure ci-dessus a permis de calculer les matrices de rigidité de chacune des mèches imprégnées de la CER. En prenant pour hypothèse que chacune d'elle est soumise à la même déformation dans la direction de sollicitation, les composantes de la matrice de rigidité de l'ensemble des mèche sont calculées par l'équation 4.98.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{n_m} L_k \bar{C}_{ij}(n) \quad (4.98)$$

Avec n_m , le nombre de mèches dans la CER et L_k , la longueur de la mèche k . Les constantes élastiques apparentes de l'ensemble des mèches imprégnées sont calculées à partir de leur matrice de rigidité :

$$E_{X_d}(mèches) = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22} \sum_{k=1}^{n_m} L_k} \quad (4.99)$$

$$E_{Y_d}(mèches) = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22} \sum_{k=1}^{n_m} L_k} \quad (4.100)$$

$$\nu_{X_d Y_d}(mèches) = \frac{A_{11}}{A_{22}} \quad (4.101)$$

$$\nu_{Y_d X_d}(mèches) = \frac{E_{Y_d}(mèches)}{E_{X_d}(mèches)} \nu_{X_d Y_d}(mèches) \quad (4.102)$$

$$G_{X_d Y_d}(mèches) = \frac{A_{33}}{\sum_{k=1}^{n_m} L_k} \quad (4.103)$$

4.3.2.3 Estimation des propriétés élastique du composite

Les propriétés du composite sont déterminées en combinant les propriétés élastiques des mèches imprégnées avec celles de la résine pure. Le matériau est considéré comme un composite UD composé des mèches imprégnées assimilées à un matériau homogène dont les constantes élastiques équivalentes sont déterminées par les équations 4.99 à 4.103 et de la résine de propriétés E_m , ν_m et G_m .

- Le module élastique dans la direction de sollicitation E_d est calculé par la loi des mélanges :

$$E_{X_d}(C) = f(V_{mc}, E_{X_d}(mèches), E_m) \quad (4.104)$$

Le coefficient de poisson et le module de cisaillement sont calculés par un modèle d'homogénéisation :

$$\nu_{X_d Y_d}(C) = f(V_{mc}, E_{mèches}, \nu_{mèches}, E_m, \nu_m) \quad (4.105)$$

$$G_{X_d Y_d}(C) = f(V_{mc}, G_{X_d Y_d}(mèches), G_m) \quad (4.106)$$

V_{mc} correspond au taux de mèche dans le composite, il est calculé par l'équation suivante :

$$V_{mc} = \frac{V_f}{V_{fm}} \quad (4.107)$$

4.3.3 Résultats

Le modèle est appliqué aux composites à renforts tricotés en fibres de verre et de basalte. Les trois modèles d'homogénéisation (loi des mélanges, modèle de Chamis et modèle de Uemura) présentés à la section 1.6.2.3 du chapitre 1 sont utilisés dans un premier temps et les résultats sont comparés aux résultats expérimentaux. Le modèle d'homogénéisation permettant d'obtenir la meilleure prédiction est ensuite sélectionné pour étudier l'influence de la prétension du tricot avant mise en œuvre du composite. L'étude est réalisée dans les trois directions de sollicitation. Dans le cas présent, l'étude porte uniquement sur les modules élastiques dans chacune des directions.

4.3.3.1 Comparaison avec l'expérience et limites du modèle

Les données d'entrée du modèle sont la géométrie du renfort, les propriétés mécaniques de la fibre et de la matrice ainsi que les taux de fibres dans la mèche V_{fm} et dans le composite V_f . La géométrie du renfort est obtenue par la méthode décrite à la section 4.3.1. Elle dépend des paramètres géométriques de la maille jersey. Dans cette étude, la géométrie de maille utilisée correspond à celle calculée avec les paramètres des éprouvettes de traction colonne dans le modèle de comportement du jersey sec (Tableau 4.1). Les caractéristiques des matériaux sont données dans le tableau 4.5. Les taux de fibres dans la mèche correspondent aux résultats de l'analyse d'images.

Fibres	E_f	ν_f	G_f	V_{fm}
Verre	80 GPa	0,25	32,0 GPa	0,7
Basalte	84 GPa	0,25	33,6 GPa	0,65
Résine	E_m	ν_m	G_m	
	3,68 GPa	0,4	1,3 GPa	
Composite	V_f Jersey	V_f JC1	V_f JC2	V_f JC3
Verre	0,31	0,29	0,38	0,43
Basalte	0,32	0,31	0,35	0,41

Tableau 4.5 – *Propriétés des matériaux*

Les résultats obtenus avec les renforts en fibres de verre et de basalte sont représentés dans les figures 4.41 et 4.42 et comparés aux résultats expérimentaux. La figure 4.41 donne les modules en fonction de la direction de sollicitation et la figure 4.42 présente les résultats en fonction de la texture du renfort.

En se concentrant dans un premier temps sur le renfort jersey, les résultats les plus proches des valeurs expérimentales sont obtenus avec la loi des mélanges. Les tableaux 4.6 et 4.7 donnent les valeurs des modules expérimentaux et théoriques ainsi que les erreurs calculées. Avec la loi des mélanges, l'erreur varie entre 7 % et 23 % selon la nature de la fibre ou la direction de sollicitation tandis qu'elle varie respectivement de 17 % à 56% et de 21% à 71% avec le modèle de Chamis et le modèle de Uemura. Les écarts sont attribués d'une part aux défauts présents dans le composite fabriqué dus à la présence de porosité (environ 3% pour le jersey et 5,4% et 8,4% pour les renforts JC (tableau 3.5 du chapitre 3) ainsi qu'à

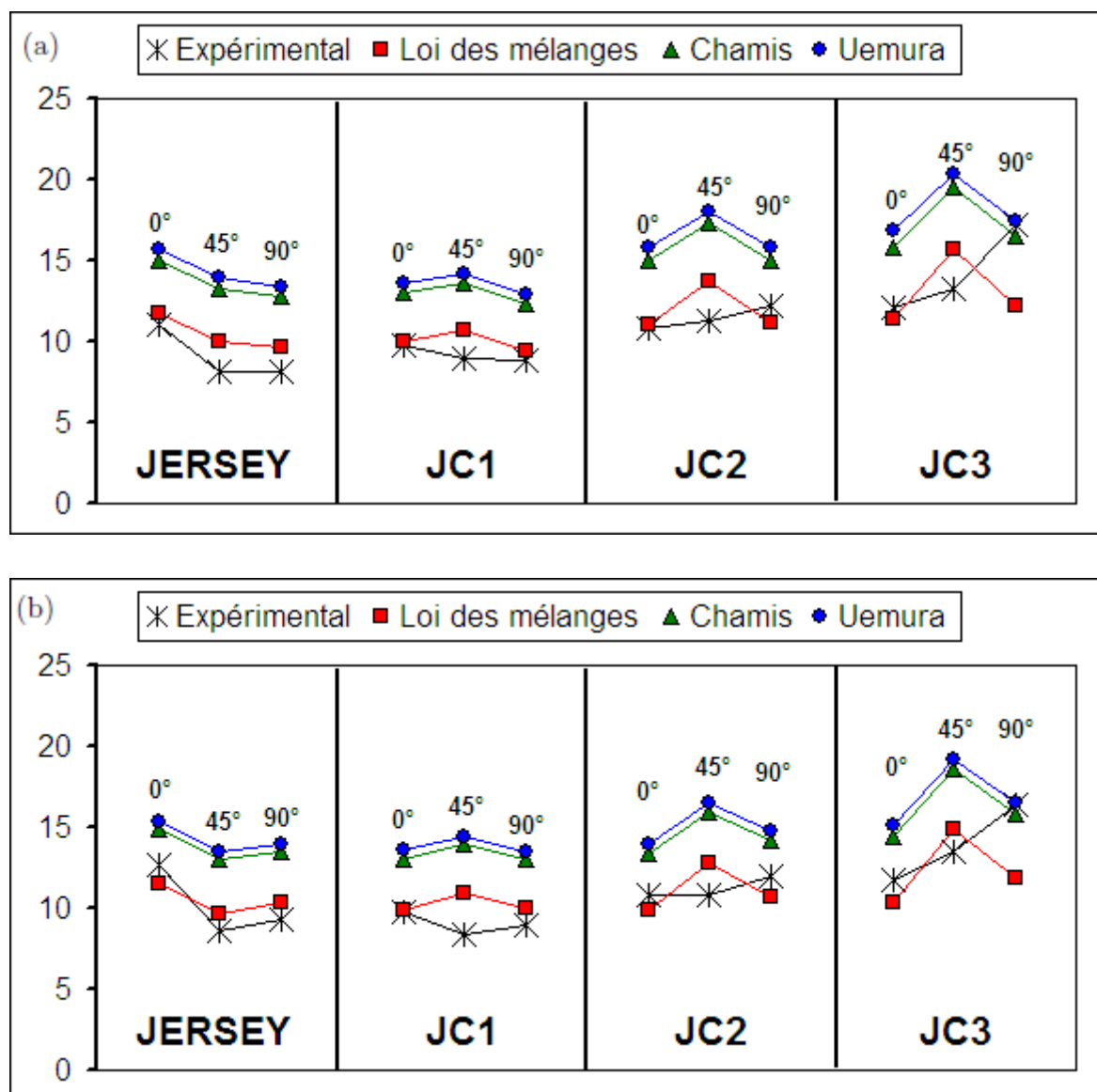


Figure 4.41 – Comparaison en fonction de la direction de sollicitation des modules élastiques théoriques et expérimentaux des composites renforcés de fibres a) de verre et b) de basalte

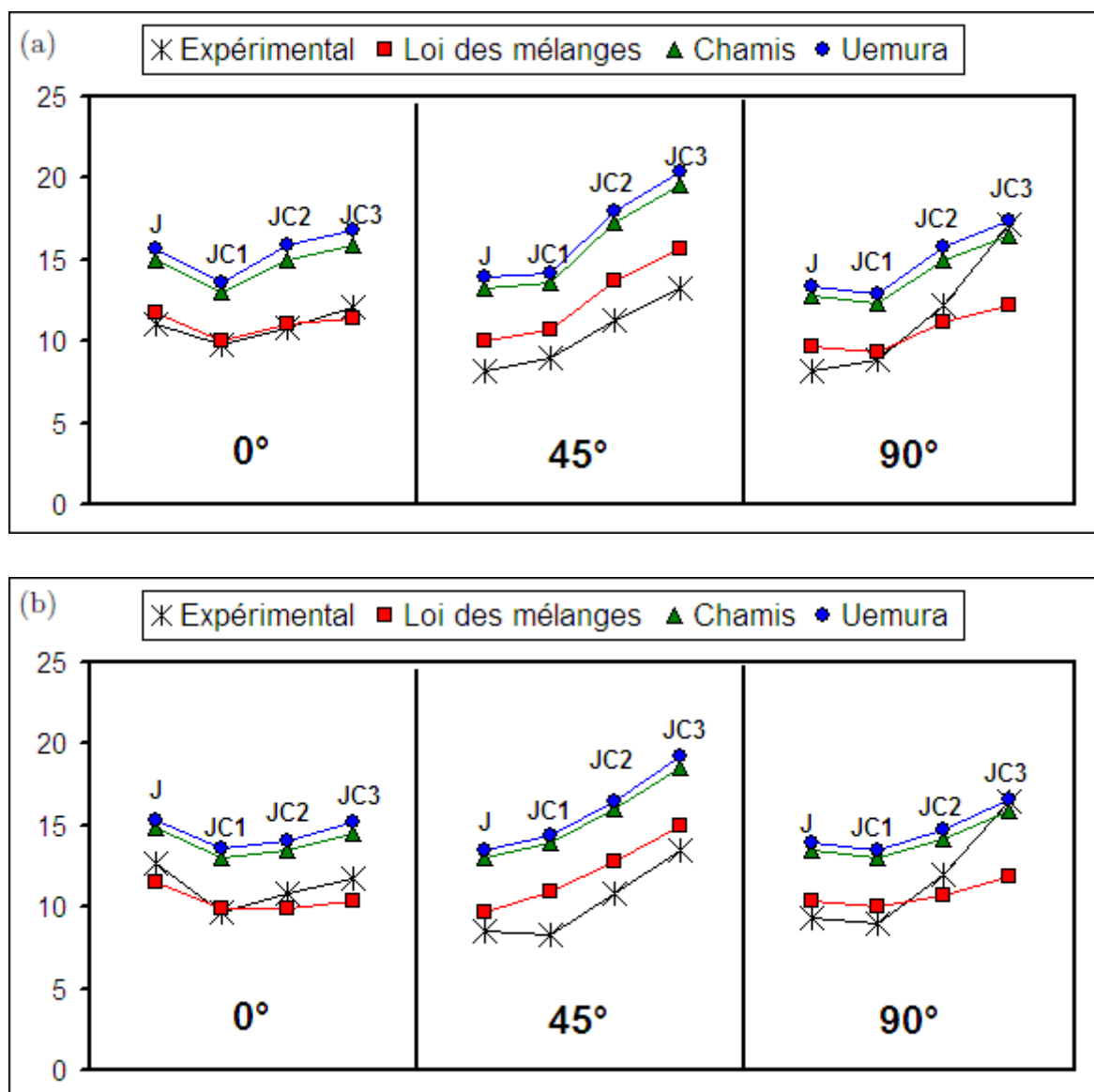


Figure 4.42 – Comparaison en fonction de la texture du renfort des modules élastiques théoriques et expérimentaux des composites renforcés de fibres a) de verre et b) de basalte

4.3. Modélisation des propriétés élastiques d'un composite à renfort tricoté

l'endommagement des fibres dans le tricot et d'autres part aux approximations faites sur la géométrie du renfort dues aux choix des paramètres initiaux et particulièrement du taux de fibres dans la mèche. Malgré ces erreurs, le module d'élasticité en fonction de la direction de sollicitation est relativement bien estimé. Dans tous les cas, la rigidité est plus élevée à 0°. Dans le cas du verre, les modules expérimentaux à 45° et 90° sont équivalents et les modules calculés sont proches. Pour le basalte, la rigidité la plus faible est obtenue à 45° dans tous les cas.

		Expérimental	Mélanges		Chamis		Uemura	
		Module	Module	erreur	Module	erreur	Module	erreur
JERSEY	0°	11,1	11,8	0,07	15,0	0,36	15,7	0,41
JERSEY	45°	8,1	10,0	0,23	13,3	0,83	13,9	0,71
JERSEY	90°	8,2	9,7	0,18	12,7	0,56	13,4	0,64
JC1	0°	9,8	10,0	0,02	13,0	0,33	13,6	0,40
JC1	45°	9,0	10,7	0,19	13,6	0,51	14,1	0,57
JC1	90°	8,8	9,4	0,06	12,3	0,39	12,9	0,46
JC2	0°	10,8	11,1	0,02	15,0	0,39	15,9	0,46
JC2	45°	11,2	13,7	0,22	17,3	0,54	18,0	0,60
JC2	90°	12,2	11,2	0,09	15,0	0,23	15,8	0,29
JC3	0°	12,0	11,4	0,06	15,9	0,32	16,8	0,40
JC3	45°	13,3	15,6	0,18	19,5	0,47	20,3	0,53
JC3	90°	17,2	12,2	0,29	16,5	0,04	17,4	0,01

Tableau 4.6 – Valeur des modules élastiques expérimentaux et théoriques des composites renforcés de fibres de verre

		Expérimental	Mélanges		Chamis		Uemura	
		Module	Module	erreur	Module	erreur	Module	erreur
JERSEY	0°	12,7	11,51	0,09	14,8	0,17	15,3	0,21
JERSEY	45°	8,6	9,66	0,13	13,0	0,52	13,5	0,58
JERSEY	90°	9,3	10,38	0,12	13,5	0,45	13,9	0,50
JC1	0°	9,7	9,89	0,02	13,1	0,34	13,6	0,40
JC1	45°	8,3	10,94	0,31	13,9	0,67	14,4	0,73
JC1	90°	9,0	10,02	0,11	13,0	0,45	13,5	0,50
JC2	0°	10,8	9,86	0,09	13,4	0,25	14,0	0,30
JC2	45°	10,8	12,75	0,18	16,0	0,47	16,5	0,52
JC2	90°	12,0	10,72	0,11	14,1	0,18	14,7	0,23
JC3	0°	11,8	10,32	0,13	14,5	0,23	15,2	0,29
JC3	45°	13,5	14,93	0,11	18,6	0,38	19,2	0,42
JC3	90°	16,4	11,82	0,28	15,9	0,04	16,5	0,01

Tableau 4.7 – Valeur des modules élastiques expérimentaux et théoriques des composites renforcés de fibres de basalte

Concernant les renforts JC, une bonne estimation de l'effet de l'insertion de mèches dans la rangée du renfort est obtenue à 0° et 45° (Figure 4.42). À 0°, la baisse du module liée à l'orientation des fibres du composite JC1 puis son augmentation avec le nombre de mèches liée à l'accroissement du taux de fibres déterminés expérimentalement sont obtenues avec le calcul. À 45°, l'augmentation de la rigidité avec le nombre de mèches insérées est observée dans tous les cas. Cependant, une variation relative des propriétés en fonction de la contexture plus importante est observée expérimentalement qu'avec le modèle et en particulier pour le basalte. À 90°, une amélioration des propriétés avec le nombre de mèches insérées est obtenue dans tous les cas. Une différence très prononcée est toutefois observée entre l'augmentation relative de la rigidité observée expérimentalement et avec le modèle. Cet écart est attribué au fait que le taux de fibres dans la mèche est considéré équivalent dans tous les composites. Or,

l'augmentation de l'épaisseur du tricot avec l'insertion des mèches amène à une compression plus importante du renfort et donc de la mèche lors de la mise en œuvre du composite. Sur la figure 4.43, le module à 90° du composite JC3 en fibre de basalte est calculé pour différentes valeurs de V_{fm} . Le taux de fibres dans la mèche, a une importante influence sur la rigidité du matériau. Avec 85 % de fibres dans la mèche, le module obtenu avec la loi des mélanges atteint la valeur expérimentale.

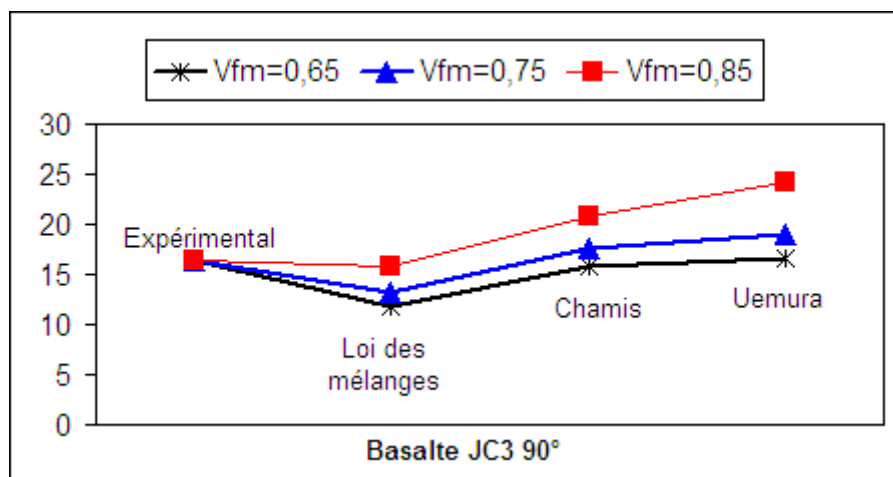


Figure 4.43 – Modules élastiques du composite JC3 en fibres de basalte en fonction de V_{fm}

Expérimentalement, l'augmentation du nombre de mèches insérées par rangée de tricot entraîne une amélioration des propriétés plus importante des propriétés élastiques à 90° qu'à 45° . La tendance inverse est obtenue par le calcul. Le modèle géométrique de la mèche prend en compte sa longueur totale et non projetée, ce qui amène à une estimation erronée de l'orientation des mèches. En diminuant la longueur de la mèche, le comportement théorique se rapproche du comportement réel (Figure 4.44). Selon la contexture, les valeurs déterminées sont soit supérieures (JC1) soit inférieures (JC2 et JC3) aux valeurs expérimentales puisque le volume de fibres dans la mèche est le même dans tous les cas.

L'analyse des résultats obtenus permet de valider le modèle utilisé pour la prédiction des modules élastiques des composites à renfort jersey et jersey chargé. Une bonne estimation des propriétés est obtenue pour un renfort jersey simple. Les écarts observés entre les valeurs théoriques et expérimentales pour les renforts JC sont attribués à des erreurs dans les valeurs des paramètres initiaux et plus particulièrement de la longueur de la mèche projetée dans la plan et du taux de fibres dans la mèche. En effet, ces paramètres ont une influence importante sur les résultats. L'augmentation de V_{fm} entraîne une augmentation des propriétés dans toutes les directions du composite et la variation de L_{FC} a un impact sur l'anisotropie du matériau. Dans la suite de l'étude, l'influence d'une prétension du renfort avant mise en forme du composite est étudiée. La loi des mélange est sélectionnée puisqu'elle permet d'obtenir la meilleure estimation des propriétés à renfort jersey.

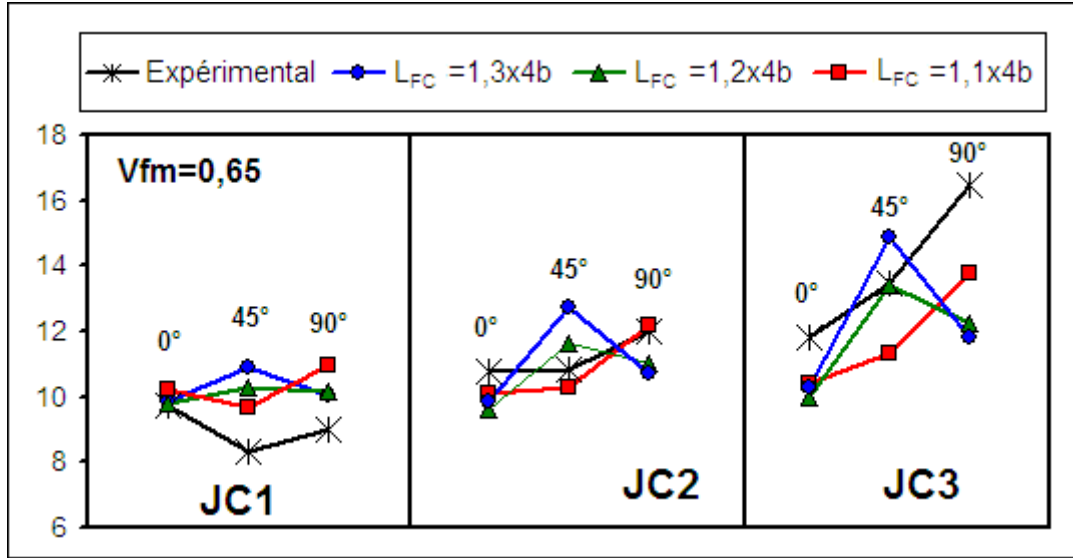


Figure 4.44 – Modules élastiques théoriques déterminés par la loi des mélanges du composite en fibres de basalte en fonction de la longueur de mèche insérée L_{FC}

4.3.3.2 Étude de l'influence de la pré-tension du tricot sur les propriétés élastiques

L'influence de la prétension dans une direction du renfort est étudiée en utilisant la géométrie de la maille calculée avec le modèle de comportement des tricots secs pour différents niveaux de déformation. Les paramètres géométriques restent identiques à ceux utilisés précédemment. La géométrie de la mèche insérée dans la rangée du renfort est calculée automatiquement à partir de chaque nouvelle largeur de maille du tricot jersey. Les caractéristiques des matériaux restent identiques à celles données dans le tableau 4.5. Seul le taux de fibres dans le composite évolue avec le taux de prétension appliqué. Il est calculé pour chaque niveau de déformation par la relation suivante :

$$V_{fi} = V_{f0} \frac{b_0 h_0}{b_i h_i} \quad (4.108)$$

La figure 4.45 présente les résultats obtenus pour 3 niveaux différents de déformation du renfort dans la direction colonne (20%, 30% et 40%).

Une prétension dans la direction colonne du tricot entraîne une amélioration des propriétés élastiques à 0° et une perte de rigidité dans les autres directions. L'augmentation des modules à 0° est plus importante que la perte dans les autres directions. Elle est d'autant plus importante avec l'insertion des mèches dans la rangée du tricot. Dans les tableaux 4.8 et 4.9 sont données les variations relatives des modules en fonction du taux de prétension par rapport au module des composites sans prétension du renfort. Pour une prétension de 40% des tricots en fibres de verre, l'augmentation de la rigidité à 0° est de 11% avec un renfort jersey et de 31% avec un renfort JC3. Respectivement, pour les fibres de basalte, la rigidité augmente de 28% à 62%. Dans les autres directions, la diminution du module ne varie que de 0% à 12% selon la direction de sollicitation, la nature de la fibre et la contexture. Cela est dû en partie à une augmentation du taux de fibres dans le matériau allant de 35% à 40% par exemple pour le JC2 en fibres de

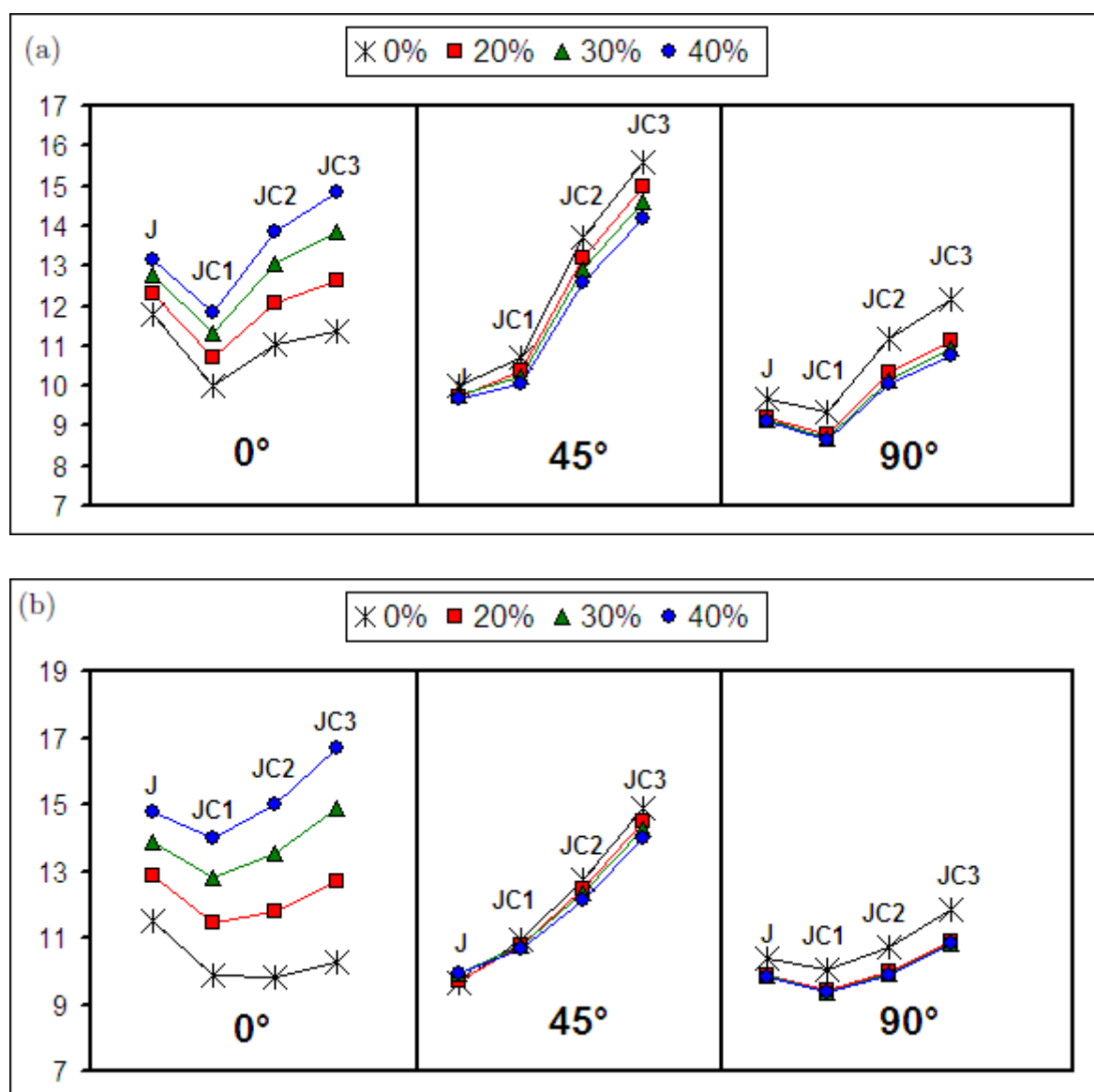


Figure 4.45 – Évolutions des modules élastiques des composites en fonction de la prétension dans la direction colonne du renfort en fibres a) de verre et b) de basalte

basalte. La prétension du tricot avant mise en œuvre présente peu d'intérêt avec un renfort jersey. En effet, elle n'a d'une part qu'une faible influence sur les propriétés du composite et d'autre part, elle augmente l'anisotropie du matériau. Les résultats montrent cependant qu'elle présente un intérêt pour les composites renforcés de JC2 et JC3. La présence des mèches dans la direction rangée du tricot a pour effet une forte augmentation des propriétés dans cette direction et la prétension dans la direction colonne entraîne une importante augmentation des modules à 0°, tandis que la perte de rigidité dans les autres directions est relativement faible.

Direction de sollicitation	Taux de prétension	Jersey	JC1	JC2	JC3
0°	20%	4%	7%	10%	11%
	30%	8%	13%	18%	22%
	40%	11%	18%	26%	31%
45°	20%	-3%	-3%	-4%	-4%
	30%	-2%	-4%	-6%	-6%
	40%	-3%	-6%	-8%	-9%
90°	20%	-4%	-6%	-8%	-9%
	30%	-5%	-7%	-9%	-10%
	40%	-5%	-8%	-10%	-12%

Tableau 4.8 – Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction colonne du tricot en fibres de verre

Direction de sollicitation	Taux de prétension	Jersey	JC1	JC2	JC3
0°	20%	11%	16%	20%	23%
	30%	21%	30%	37%	45%
	40%	28%	41%	52%	62%
45°	20%	0%	-1%	-2%	-3%
	30%	3%	-1%	-3%	-4%
	40%	3%	-2%	-4%	-6%
90°	20%	-5%	-6%	-7%	-8%
	30%	-5%	-6%	-7%	-8%
	40%	-5%	-7%	-8%	-9%

Tableau 4.9 – Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction colonne du tricot en fibres de basalte

Les résultats obtenus pour 3 niveaux différents de déformation du renfort dans la rangée sont présentés à la figure 4.46. En considérant que la déformation du tricot n'atteint pas l'alignement total des mèches flottées, la prétension maximale appliquée est de 25%. Les variations relatives des modules en fonction du taux de prétension par rapport aux modules des composites sans prétension du renfort sont données dans les tableaux 4.8 et 4.9.

Un faible impact est observé sur les composites à renfort jersey. Une augmentation des propriétés maximale de 10% est obtenue à 90° et la diminution des modules dans les autres directions est négligeable. Concernant les renforts JC, un affaiblissement de la rigidité est observée à 0° et 45°. À 0°, la diminution du module est relativement faible (maximum 15%). La prétension du renfort a cependant un effet plus néfaste à 45°. La diminution du module est d'autant plus importante que le nombre de mèches insérées est élevé et une perte de 35% est observée dans les cas les plus défavorables. À 0°, une augmentation de la rigidité est

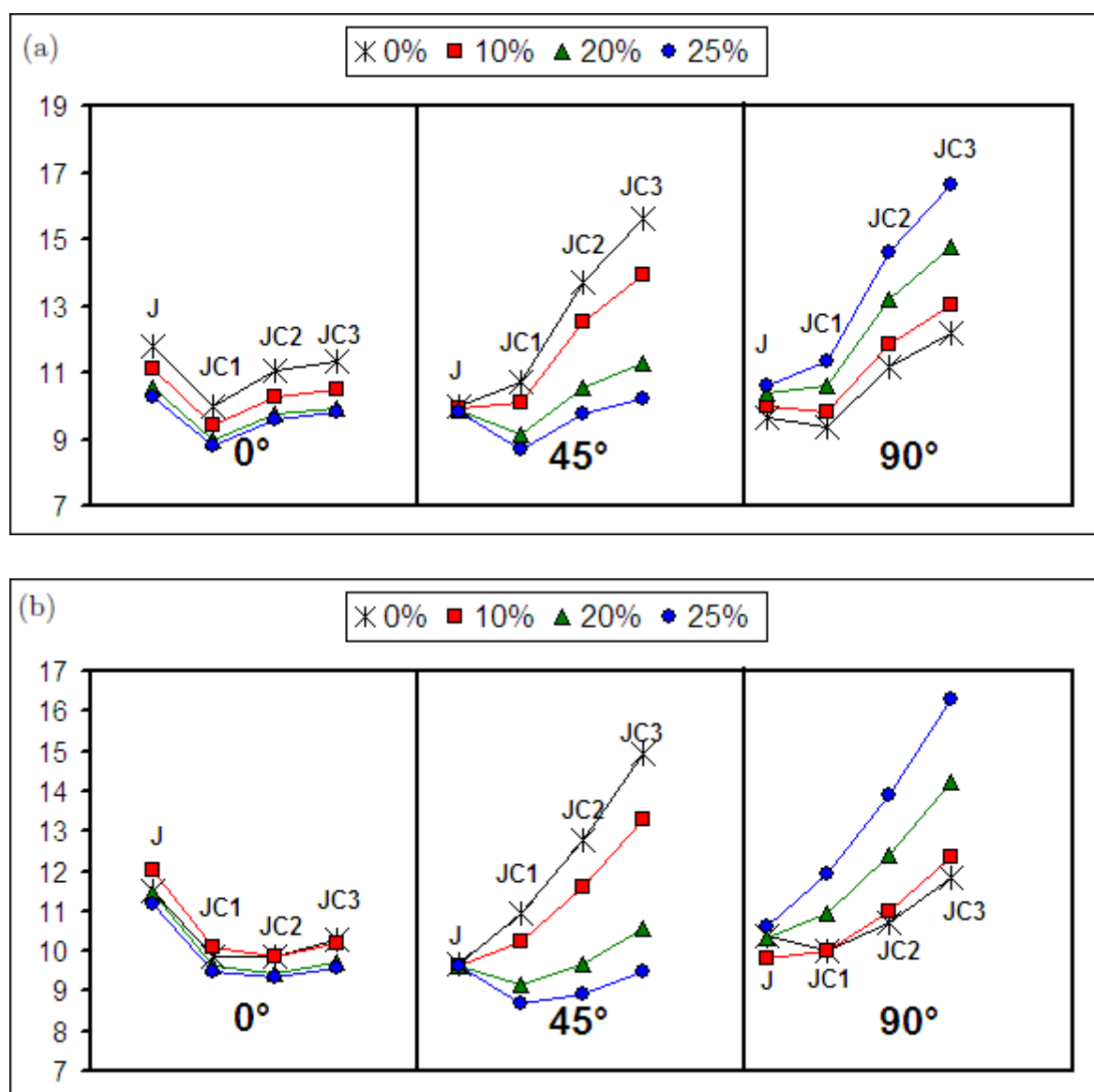


Figure 4.46 – Évolutions des modules élastiques des composites en fonction de la prétension dans la direction rangée du renfort en fibres a) de verre et b) de basalte

4.3. Modélisation des propriétés élastiques d'un composite à renfort tricoté

observée avec un renfort JC2 et JC3. À 10% de déformation du renfort, cette augmentation est négligeable. Elle est cependant significative avec une prétension de 20% et 25%.

Direction de sollicitation	Taux de prétension	Jersey	JC1	JC2	JC3
0°	10%	-6%	-6%	-7%	-8%
	20%	-10%	-10%	-12%	-12%
	25%	-13%	-12%	-13%	-14%
45°	10%	-1%	-6%	-9%	-11%
	20%	-1%	-15%	-23%	-28%
	25%	-2%	-19%	-29%	-35%
90°	10%	3%	5%	6%	7%
	20%	8%	13%	18%	21%
	25%	10%	21%	31%	37%

Tableau 4.10 – Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction rangée du tricot en fibres de verre

Direction de sollicitation	Taux de prétension	Jersey	JC1	JC2	JC3
0°	10%	5%	2%	0%	-1%
	20%	-1%	-3%	-4%	-6%
	25%	-3%	-4%	-5%	-7%
45°	10%	0%	-6%	-9%	-11%
	20%	0%	-17%	-24%	-29%
	25%	0%	-20%	-30%	-36%
90°	10%	-5%	0%	3%	5%
	20%	0%	9%	16%	20%
	25%	2%	19%	30%	38%

Tableau 4.11 – Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction rangée du tricot en fibres de basalte

Une déformation dans la direction rangée du tricot avant mise en forme du composite a peu d'intérêt avec un renfort jersey pour ces niveaux de déformation. Un calcul supplémentaire a été effectué en considérant la déformation maximale atteinte avec le modèle de comportement du jersey simple. La variation des modules donnée dans le tableau 4.12 montre une importante augmentation de la rigidité à 90° avec une perte des propriétés à 0°, tandis que les valeurs des modules à 45° restent inchangés. La prétension du renfort jersey dans la rangée du tricot à pour effet de diminuer l'anisotropie du composite.

Direction de sollicitation	0°	45°	90°
Verre (56% de déformation)%	-17%	-2%	35%
Basalte (69% de déformation)	-14%	1%	40%

Tableau 4.12 – Variation relative des modules élastiques des composites à renfort jersey avec une déformation théorique maximale du tricot

Une déformation du renfort de contextures JC avant mise en œuvre du composite a pour effet d'améliorer de manière significative les performances du matériau dans une direction du renfort et d'obtenir un matériau fortement anisotrope.

4.4 Conclusion intermédiaire

Ce chapitre a été consacré à la mise en œuvre d'un modèle analytique visant à prédire le comportement structural d'un tricot jersey et d'estimer les propriétés élastiques du matériau composite à partir des paramètres géométriques de la maille et des propriétés des matériaux. Ce modèle comporte deux parties. La première, basée sur le modèle de Araújo, utilise la théorie de l'élasticité pour déterminer le comportement structural du tricot jersey dans deux directions du renfort. En traction colonne, le blocage des mailles ainsi qu'une modification du diamètre de la mèche sont pris en compte. Les courbes de comportement calculées sont proches des courbes expérimentales. Les résultats ont mis en évidence l'importante influence de la section de la mèche sur le comportement. En traction rangée, le modèle est limité par le fait que la mèche est considérée de diamètre constant tout au long de l'essai, cependant les pentes des courbes obtenues par le modèle sont proches des pentes expérimentales. Ce modèle permet de calculer la géométrie de la maille.

La géométrie de la maille calculée permet d'alimenter la deuxième partie du modèle dont l'objectif est d'estimer, en utilisant le principe d'homogénéisation, les propriétés élastiques du composite à renfort jersey et jersey chargé à partir de l'orientation des fibres. Un deuxième modèle géométrique a été mis en œuvre pour déterminer l'orientation des mèches insérées dans la base jersey des contextures JC. Les résultats obtenus montrent une bonne estimation des propriétés du composite à renfort jersey, ce qui permet de valider le modèle. Des écarts entre les modules des composites à renfort JC déterminés par le calcul et expérimentalement sont attribués aux erreurs dans l'estimation du taux de fibres dans la mèche et de la longueur de la mèche insérée dans le jersey. Une variation de ces paramètres a une influence croissante avec le nombre de mèches insérées par rangée sur le calcul des modules. La géométrie de la maille déterminée pour différents niveaux de déformations par le modèle de comportement du jersey sec a permis d'étudier théoriquement l'influence de la prétension du renfort avant mise en œuvre du composite sur les propriétés élastiques du matériau. Cette étude a montré qu'une déformation du tricot dans la direction colonne présente un intérêt pour les composites à renfort JC2 et JC3. La présence des mèches dans la direction rangée du tricot a pour effet d'augmenter les propriétés du composite à 90° et la prétension dans la direction colonne entraîne une importante augmentation des modules à 0° , avec une perte relativement faible de la rigidité dans les autres directions. Cela permet de diminuer l'anisotropie du matériau tout en conservant de bonnes propriétés. Au contraire, une déformation du renfort dans la direction rangée du tricot a pour effet d'améliorer significativement les performances à 90° des composites à renfort JC, ce qui permet d'obtenir un matériau fortement anisotrope avec des propriétés optimisées dans une direction. La prétension du renfort jersey a pour effet de diminuer la rigidité à 0° et de l'augmenter à 90° ce qui permettrait de limiter l'anisotropie du matériau. Cette étude a mis en évidence l'importance de l'orientation des fibres sur le comportement du matériau. Dans l'étude expérimentale, il a été mis en évidence que le choix du nombre de mèches insérées dans le jersey permettait de jouer sur l'anisotropie des matériaux. L'étude théorique montre que la combinaison de l'insertion de mèches avec la prétension du renfort permet d'obtenir une plus large échelle de propriétés, d'augmenter les performances tout en diminuant l'anisotropie du matériau ou au contraire d'améliorer fortement les propriétés dans une seule direction. L'augmentation de la longueur de la mèche insérée dans le jersey devrait amplifier l'anisotropie du composite en augmentant la prétension à 90° afin d'obtenir un matériau avec des propriétés optimisées dans une direction.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de thèse a été consacré à l'étude du comportement des matériaux composites à renforts tricotés. L'objectif a été de mettre en relation l'architecture du tricot avec d'une part le comportement en traction du renfort sec et d'autre part celui du composite élaboré par injection de résine. L'influence de l'architecture du renfort a été étudiée en considérant dans un premier temps les contextures de référence des tricots simple et double fonture (le jersey et la côte), puis en optimisant dans un deuxième temps la contexture jersey par l'insertion de mèches non tricotées dans la rangée (contextures JC1, JC2 et JC3 obtenues respectivement par l'ajout d'une, de deux et de trois mèches par rangée de tricot). L'influence de la nature de la fibre a également été prise en compte à travers trois types de fibres différentes : la fibre de verre, de basalte et de carbone. Les études expérimentales réalisées sur les renforts secs et sur les composites ont permis d'identifier les différents paramètres pertinents vis à vis de leur comportement et de leur endommagement. La mise en œuvre d'un modèle analytique de prédiction du comportement structural d'un tricot jersey et d'estimation des propriétés élastiques des composites à renforts tricotés de base jersey a permis d'établir des relations théoriques entre la géométrie du renfort et les propriétés des matériaux. Les résultats obtenus, permettent également de proposer des pistes d'amélioration des propriétés des composites à renforts tricotés.

L'étude bibliographique présentée dans le premier chapitre a permis de mettre en évidence les intérêts et les limites des textiles tricotés en tant que renfort de composites. Les tricots techniques présentent de nombreux avantages pour la mise en œuvre de pièces composites de formes complexes. Le procédé automatisé de tricotage permet de réaliser rapidement des préformes directement à la forme de la pièce désirée et l'importante déformabilité des tricots, leur confère une excellente drapabilité. En outre, les composites à renforts tricotés affichent des propriétés intéressantes à l'impact en raison d'une ténacité inter-laminaire élevée, et par conséquent, une tolérance à l'endommagement plus importante que les composites à renforts tissés ou UD. Leurs propriétés mécaniques dans le plan sont toutefois relativement faibles et comparables à celles des composites à fibres courtes. Une forte dissymétrie traction-compression est observée. Leur comportement en compression est quasi isotrope et dépend essentiellement du taux de fibres. En revanche leur propriétés en tractions sont anisotropes et dépendent de nombreux paramètres liés à la contexture, aux caractéristiques géométriques du tricot ou à l'élaboration du composite (taux de fibres, de prétension du renfort).

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude du comportement des tricots secs sollicités en traction uniaxiale. L'étude s'est focalisée dans un premier temps sur les contextures jersey et côte. Elle a permis de comprendre les mécanismes de déformation des textiles tricotés

et d'identifier deux phases successives dans le comportement : une importante déformation structurale du tricot se produit jusqu'au blocage des mailles à partir duquel les efforts sont transmis aux fibres et une déformation physique du matériau a lieu. Dans les deux phases, la géométrie de la maille a une influence importante sur le comportement tandis que la nature de la fibre intervient essentiellement dans la seconde phase. Le comportement des tricots secs simples a été mis en relation avec leur architecture. Une déformabilité plus importante dans la direction rangée est attribuée à la direction d'élaboration des tricots. La structure tridimensionnelle de la côte confère au tricot une déformabilité plus importante. Ses propriétés mécaniques après blocage des mailles, rapportées à une colonne de tricot, sont réduites par rapport au jersey en raison de la forme plus courbée des mèches due à une densité de mailles environ deux fois plus élevée que celle du jersey. Les meilleures performances sont obtenues dans la direction colonne de la contexture jersey.

Dans la seconde partie du chapitre, L'insertion de mèches dans la rangée du tricot jersey a été étudiée et a montré que la présence de ces mèches avait une faible influence sur le comportement du tricot sec sollicité dans la direction colonne. Elle intervient essentiellement sur la configuration de la maille dans son état initial et dans son état bloqué. Cette insertion améliore considérablement les propriétés dans la direction rangée dont le comportement se rapproche de celui des textiles tissés.

Dans le troisième chapitre, le comportement des matériaux composites à renforts tricotés a été étudié expérimentalement en fonction de l'architecture du renfort et de la nature de la fibre. Des composites renforcées des contextures étudiées dans le chapitre précédent ont été élaborés par injection de résine époxy. Les matériaux fabriqués ont été soumis à des essais de traction longitudinale dans trois directions du renfort. La stéréo-corrélation d'images a été utilisée pour suivre l'évolution des champs de déformation sur la surface des éprouvettes et le mode d'endommagement a été étudié par l'observation des faciès de rupture. Le travail s'est focalisé dans un premier temps sur les renforts jersey et côte et dans un second temps, sur les renforts JC avec mèches insérées. Cette étude a mis en évidence que le comportement des matériaux composites était fortement lié à l'architecture du renfort et à la nature de la fibre. La structure tridimensionnelle des tricots côte, qui comprend des fibres fortement courbées et qui n'a pas de direction d'orientation privilégiée des fibres, confère au composite des propriétés mécaniques faibles dans toutes les directions et un comportement quasi-isotrope. Malgré une rupture orientée différemment selon la direction de sollicitation, le mode d'endommagement observé est similaire. L'architecture du tricot jersey, considérée comme bidimensionnelle avec une direction d'orientation des fibres privilégiée dans la direction colonne confère au composite des propriétés mécaniques plus élevées dans cette direction et plus faibles et similaires à 45° et 90° . Les modes d'endommagement à 0° sont également différents de ceux observés à 45° et 90° .

L'insertion de mèches non tricotées dans la rangée du renfort jersey a un impact important sur le comportement des composites dans les différentes directions de sollicitations. Cet impact est lié à la distribution des fibres dans la matrice. La diminution des propriétés des composites dans la direction 0° est due à l'augmentation de la proportion de fibres orientées dans la direction transverse à la sollicitation, entraînant une perte des propriétés élastiques du matériau et une diminution de la résistance due à une propagation des fissures plus rapide le long de ces mèches. Au contraire, une importante augmentation des propriétés des composites est observée à 90° . L'orientation des mèches dans une direction proche de la sollicitation engendre

une augmentation du module élastique et leur présence limite la propagation des fissures dans la direction colonne du renfort augmentant la résistance du matériau. La forme ondulée des mèches a pour conséquence d'augmenter également la proportion de fibres orientées à 45° , améliorant les propriétés mécaniques du composite dans cette direction. Les mesures de champs de déformation par stéréo-corrélation d'images mettent en évidence une distribution des déformations spécifique à la texture du renfort et à la direction de sollicitation. La nature de la fibre a également une influence sur les propriétés mécaniques du composite. Les composites renforcés de fibres de carbone atteignent les meilleures performances dans tous les cas de figure. La nature de la fibre a toutefois un impact plus ou moins prononcé sur le comportement du matériau selon les directions de sollicitation et la structure du tricot. Elle intervient d'autant plus significativement sur les propriétés élastiques lorsque la proportion de fibres orientées dans la direction de sollicitation est importante.

Dans le quatrième chapitre, un modèle analytique visant à prédire le comportement structural d'un tricot jersey et d'estimer les propriétés élastiques du matériau composite à partir des paramètres géométriques de la maille et des propriétés des matériaux a été proposé. Ce modèle comporte deux parties. La première, basée sur une évolution du modèle de Araújo, utilise la théorie de l'élasticité pour déterminer le comportement structural du tricot jersey dans deux directions du renfort. En traction colonne, le blocage des mailles ainsi qu'une modification du diamètre de la mèche sont pris en compte. Les courbes de comportement calculées sont proches des courbes expérimentales. Les résultats ont mis en évidence l'intérêt de prendre en compte une section variable de la mèche pour une meilleure description du comportement. En traction rangée, le modèle est limité par le fait que la mèche est considérée de diamètre constant tout au long de l'essai, cependant les pentes des courbes obtenues par le modèle sont proches des pentes expérimentales. Ce modèle permet en outre de calculer les coordonnées de la fibre neutre de la maille.

La géométrie de la maille ainsi calculée a été utilisée pour alimenter la deuxième partie du modèle dont l'objectif est d'estimer, en utilisant le principe d'homogénéisation, les propriétés élastiques du composite à renfort jersey et jersey chargé à partir de l'orientation des fibres dans la cellule élémentaire représentative. Un deuxième modèle géométrique a été proposé pour déterminer l'orientation des mèches insérées dans la base jersey. Les résultats obtenus montrent une bonne estimation des propriétés du composite à renfort jersey, ce qui permet de valider le modèle. Des écarts entre les modules des composites à renforts JC déterminés par le calcul et expérimentalement sont attribués aux erreurs dans l'estimation du taux de fibres dans la mèche et de la longueur de la mèche insérée dans le jersey. Une variation de ces paramètres a une influence croissante avec le nombre de mèches insérées par rangée sur le calcul des modules. La géométrie de la maille déterminée pour différents niveaux de déformations par le modèle de comportement du jersey sec a permis d'étudier théoriquement l'influence d'une prétension du renfort avant mise en œuvre du composite sur les propriétés élastiques du matériau. La prétension du renfort jersey simple a pour effet de diminuer la rigidité à 0° et de l'augmenter à 90° ce qui permet de limiter l'anisotropie du matériau. La présence des mèches dans la direction rangée du tricot a pour effet d'augmenter les propriétés du composite à 90° et sa prétension dans la direction colonne entraîne une importante augmentation des modules à 0° , avec une perte relativement faible de la rigidité dans les autres directions. Cela permet de diminuer l'anisotropie du matériau tout en conservant de bonnes propriétés. Au contraire, une déformation du renfort dans la direction rangée du tricot a pour effet d'améliorer

significativement les performances à 90° des composites, ce qui permet d'obtenir un matériau fortement anisotrope avec des propriétés optimisées dans une direction.

L'ensemble des résultats obtenus ont mis en évidence l'influence importante de l'architecture du tricot sur les propriétés des renforts secs et des composites résultants. Celle-ci a un impact sur la déformabilité des tricots secs et leur configuration à l'état bloqué et par conséquent sur les propriétés du tricot après blocage des mailles. Cette étude a aussi mis en évidence l'importance de l'orientation des fibres, liée à la contexture, sur le comportement du matériau composite. Le choix du nombre de mèches insérées dans le jersey permet de modifier l'anisotropie des matériaux. L'étude théorique montre que la combinaison d'une insertion de mèches avec une prétension du renfort permettrait d'obtenir une plus large échelle de propriétés, d'augmenter les performances tout en diminuant l'anisotropie du matériau ou au contraire d'améliorer fortement les propriétés dans une seule direction. L'augmentation de la longueur de la mèche insérée dans le jersey devrait amplifier l'anisotropie du composite en augmentant la prétension à 90° afin d'obtenir un matériau avec des propriétés optimisées dans une direction. La contexture jersey optimisée semble être un bon candidat pour le renforcement de pièces composites de formes tubulaire.

Une certain nombre de perspectives peuvent être envisagées à la suite de ce travail.

Dans cette étude, les propriétés des matériaux ont été essentiellement améliorées dans une seule direction en insérant des mèches non tricotées dans la direction rangée du tricot. La technologie de tricotage ne permet pas d'insérer des mèches dans la direction colonne du renfort, cependant elle permettrait d'insérer des mèches orientées à 45° . Cette solution est envisagée pour optimiser les propriétés des matériaux dans d'autres directions du renfort.

Les résultats issus du modèle ont permis d'estimer que la prétension des tricots permettrait d'améliorer les propriétés des matériaux dans différentes directions. Il serait intéressant de vérifier ces estimations par des essais expérimentaux.

Enfin, l'étude s'est concentrée uniquement sur le comportement des tricots secs en traction. Il serait intéressant d'alimenter cette étude par des essais de cisaillement plan. L'insertion des mèches non tricotés dans la rangée du renfort permet d'améliorer les propriétés du textile et du composite, cependant son impact sur la drapabilité n'a pas été étudié et peut être néfaste pour la mise en œuvre de pièces de forme complexes.

Concernant la partie modélisation, de nombreuses perspectives sont également envisagées. Dans la partie existante du modèle de comportement des tricots secs, une évolution du diamètre de la mèche dans la direction rangée ainsi que les effets du frottement entre les mailles adjacentes dans les deux directions de sollicitations doivent être pris en compte. Le modèle de comportement des tricots secs est limité aux déformations liées à la flexion de la mèche, sa prolongation par la prise en compte de la compression puis par la traction de la mèche doit être réalisée. À plus long terme, le passage d'un modèle 2D à un modèle 3D semble être une bonne perspective pour limiter les erreurs liées entre autre au choix de la longueur de mèche et permettrait d'utiliser une géométrie 3D dans le modèle de comportement des composites. Il conviendrait d'approcher la forme de la mèche par une section elliptique pour obtenir des

résultats plus réalistes.

Le modèle d'estimation des propriétés élastiques des composites permet d'obtenir de bons résultats. Les écarts sont attribués en grande partie à des erreurs dans les paramètres. La prise en compte d'une géométrie de tricot 3D limiterait effectivement ces erreurs mais il conviendrait également d'étudier la variation du taux de fibres dans la mèche en fonction des contextures, du nombre de couches et de l'épaisseur de la contexture. Enfin, cette modélisation doit être prolongée par un modèle de prédiction de la résistance à la rupture.

Annexes

Sommaire

A	Calcul du moment quadratique d'une mèche	215
A.1	Détermination des dimensions de la section de la mèche	215
A.2	Moment quadratique d'un filament :	215
A.3	Moment quadratique de la mèche :	216
A.4	Rigidité en flexion de la mèche :	216
B	Courbes expérimentales de traction sur les tricots secs simples .	219
B.1	Traction colonne sur tricots côte en fibres de verre	219
B.2	Traction rangée sur tricots côte en fibres de verre	219
B.3	Traction colonne sur tricots jersey en fibres de verre	220
B.4	Traction rangée sur tricots jersey en fibres de verre	220
B.5	Traction colonne sur tricots côte en fibres de basalte	221
B.6	Traction rangée sur tricots côte en fibres de basalte	221
B.7	Traction colonne sur tricots jersey en fibres de basalte	222
B.8	Traction rangée sur tricots jersey en fibres de basalte	222
B.9	Traction colonne sur tricots côte en fibres de carbone	223
B.10	Traction rangée sur tricots côte en fibres de carbone	223
B.11	Traction colonne sur tricots jersey en fibres de carbone	224
B.12	Traction rangée sur tricots jersey en fibres de carbone	224
C	Courbes expérimentales de traction sur les tricots secs JC . . .	225
C.1	Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre . . .	225
C.2	Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre . . .	226
C.3	Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de basalte . .	227
C.4	Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de basalte . .	228
C.5	Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de carbone .	229
C.6	Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de carbone . .	230
D	Résultats des mesures de viscosité effectuées sur le mélange de	
	résine SR1710 + SD8822	231
E	Principe de la stéréo-corrélation d'images	233
E.1	La corrélation d'images numériques 2D :	233
E.2	La stéréo-corrélation d'images numériques :	233
E.3	Le calibrage du système stéréoscopique :	235
F	Résultats des essais de traction sur composites renforcés de tri-	
	cots de texture simple	237
F.1	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés	
	de tricot côte en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	237
F.2	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés	
	de tricot jersey en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	238

F.3	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	239
F.4	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	240
F.5	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	241
F.6	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	242
G	Résultats des essais de traction sur composites renforcés de tricots JC	243
G.1	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	243
G.2	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	244
G.3	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°	245
G.4	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	246
G.5	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	247
G.6	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°	248
G.7	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	249
G.8	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	250
G.9	Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°	251

A Calcul du moment quadratique d'une mèche

A.1 Détermination des dimensions de la section de la mèche

La mèche est composée de N_f filaments de diamètre d_f . En supposant un empilement hexagonal parfait des filaments dans la mèche, le section de la mèche S_m vérifie la relation suivante :

$$N_f \pi \frac{d_f^2}{4} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} S_m \quad (109)$$

Dans le cas d'une section circulaire de diamètre d_m , on obtient donc :

$$N_f d_f^2 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} d_m^2 \quad (110)$$

Dans le cas d'une section elliptique de demi-grand axe a et de demi-petit axe b , a et b sont liés par relation suivante :

$$b = \frac{N_f d_f^2 \sqrt{3}}{2\pi a} \quad (111)$$

En supposant la section petite devant les dimensions de la boucle. Au niveau du croisement entre les mailles adjacentes, le rayon de courbure R_c de la ligne neutre au point de contact entre les mèches est supposé égal au rayon de courbure de la section elliptique au point de plus grand rayon de courbure. La connaissance de ce rayon de courbure R_c donne une nouvelle relation entre a et b :

$$R_c = \frac{a^2}{b} \quad (112)$$

Les dimensions de la section elliptique a et b en fonction du rayon de courbure local de la fibre neutre R_c , du diamètre des filaments d_f et du nombre de filaments N_f sont donnés par :

$$a = \left(\frac{R_c N_f d_f^2 \sqrt{3}}{2\pi} \right)^{1/3} \quad (113)$$

$$b = \left(\frac{3 N_f^2 d_f^4}{4\pi^2 R_c} \right)^{1/3} \quad (114)$$

A.2 Moment quadratique d'un filament :

Le moment quadratique I_{Gix}^{fi} d'un filament i de section circulaire de diamètre d_f en son centre Gi autour de l'axe x est :

$$I_{Gix}^{fi} = \frac{\pi d_f^4}{64} \quad (115)$$

A.3 Moment quadratique de la mèche :

On cherche à calculer I_{Ox}^m le moment quadratique de la mèche de section elliptique (demi-axes a et b) en son centre O autour de l'axe x , correspondant au grand axe de l'ellipse, y correspondant au petit axe.

$$I_{Ox}^m = \sum_{i=1}^{N_f} I_{Ox}^{fi} \quad (116)$$

D'après le théorème de Huygens :

$$I_{Ox}^{fi} = I_{Gix}^{fi} + \pi \frac{d_f^2}{4} y_{Gi}^2 \quad (117)$$

On obtient le module quadratique de la mèche :

$$I_{Ox}^M = \sum_{i=1}^{N_f} I_{Ox}^{fi} = \frac{N_f \pi d_f^4}{64} + \frac{\pi d_f^2}{4} \sum_{i=1}^{N_f} y_{Gi}^2 \quad (118)$$

En supposant toujours l'empilement parfait et en plaçant l'axe x le long d'une ligne dense, l'empilement est composé de N_L lignes de coordonnées y_k et distantes les unes des autres de $d\sqrt{3}/2$. Chaque ligne est composée de N_k filaments.

$$\frac{N_L - 1}{2} = \text{ent} \left(\frac{b - \frac{d_f}{2}}{d\frac{\sqrt{3}}{2}} \right) + 1 \quad (119)$$

$$y_k = k d_f \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (120)$$

$$N_k = \text{ent} \left(\frac{2x_k}{d_f} \right) + 1 \quad (121)$$

Où $k = 0$ correspond à l'axe Ox et x_k est l'abscisse du point de l'ellipse d'ordonnée y_k .

$$x_k = a \sqrt{1 - \frac{k^2 \pi^2 a^2}{N_f^2 d_f^2}} \quad (122)$$

Le moment quadratique de la mèche devient alors :

$$I_{Ox}^M = \frac{N_f \pi d_f^4}{64} + \frac{\pi d_f^2}{4} \sum_{k=1}^{\frac{N_L-1}{2}} N_k y_k^2 \quad (123)$$

A.4 Rigidité en flexion de la mèche :

La rigidité en flexion de la mèche est donnée par :

$$B = E \times I_{Ox}^M \quad (124)$$

La figure A.1 représente la variation du moment quadratique de la mèche de fibres de verre de section circulaire en fonction de son diamètre et la figure A.2 représente la variation du module de flexion en fonction de la forme de l'ellipse de la mèche. Ces graphiques montrent

que la forme de la mèche ainsi que l'empilement des filaments ont une influence négligeable sur les moments quadratiques et les modules de flexion.

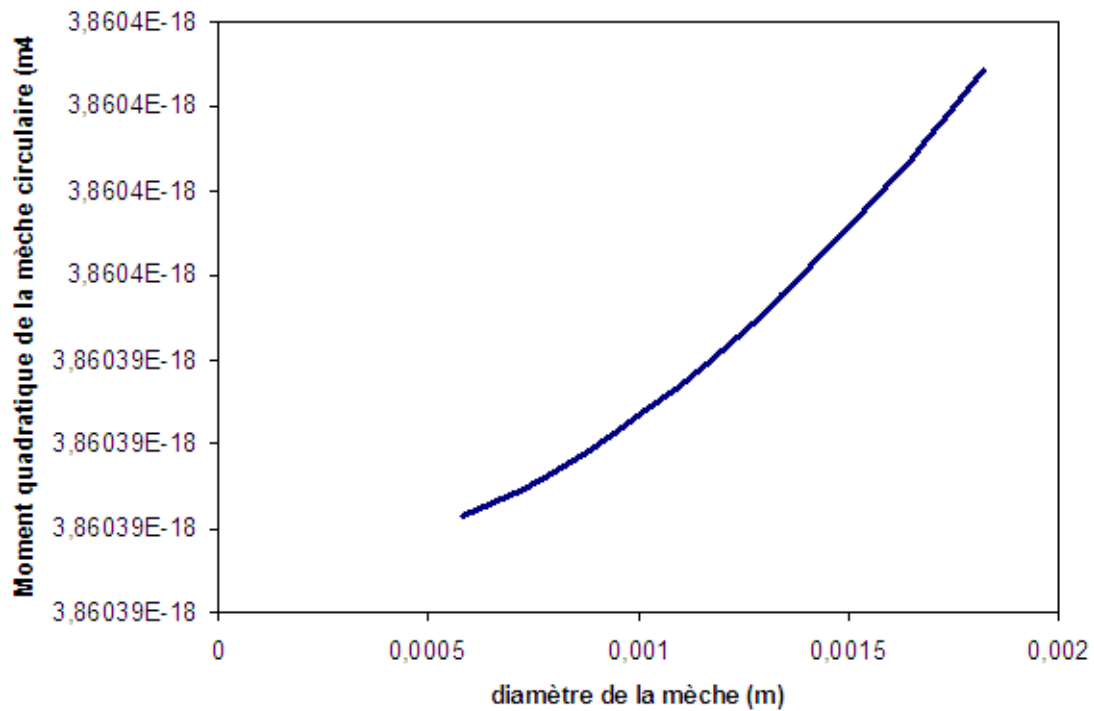


Figure A.1 – Évolution du moment quadratique d'une mèche de fibres de verre en fonction de le diamètres de sa section circulaire (empilement des filament)

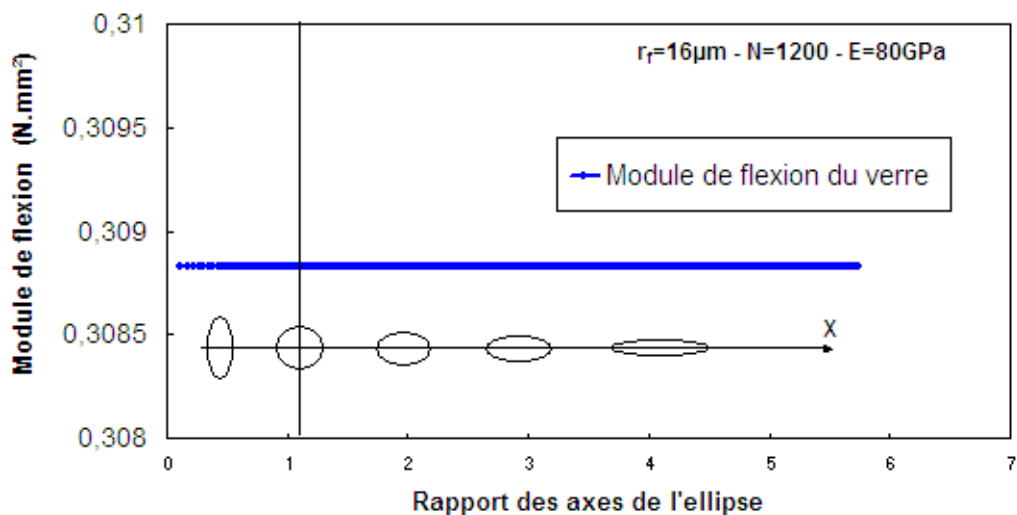


Figure A.2 – Évolution du module de flexion d'une mèche de fibres de verre en fonction de sa section

B Courbes expérimentales de traction sur les tricots secs simples

B.1 Traction colonne sur tricots côte en fibres de verre

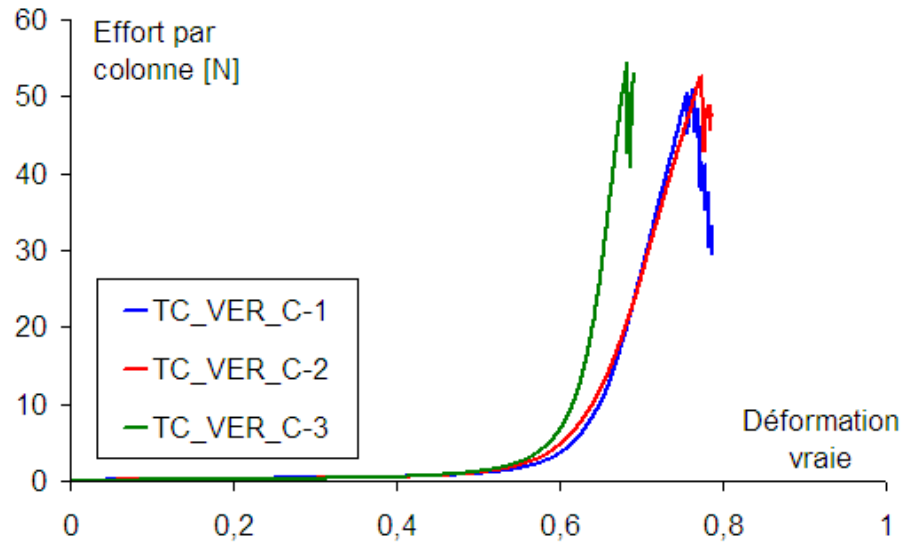


Figure B.1 – Traction colonne Verre Côte

B.2 Traction rangée sur tricots côte en fibres de verre

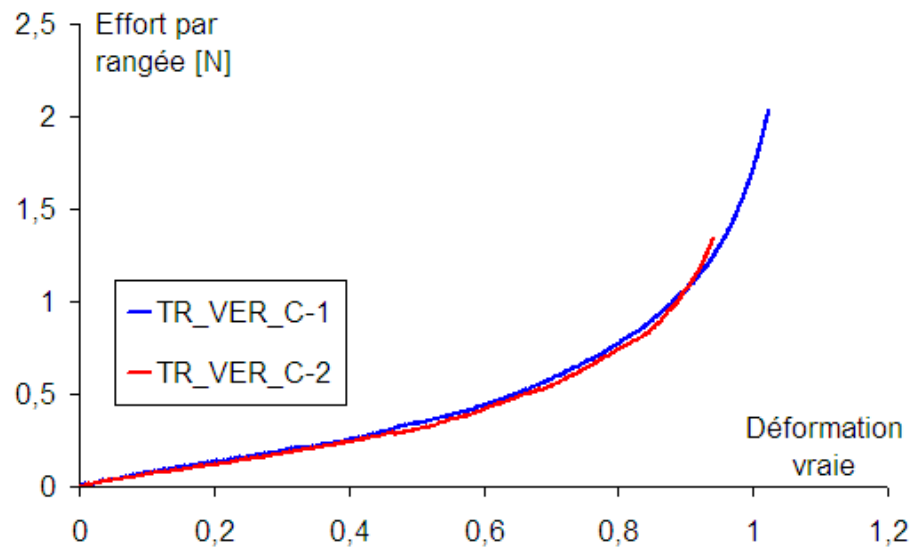


Figure B.2 – Traction rangée Verre Côte

B.3 Traction colonne sur tricots jersey en fibres de verre

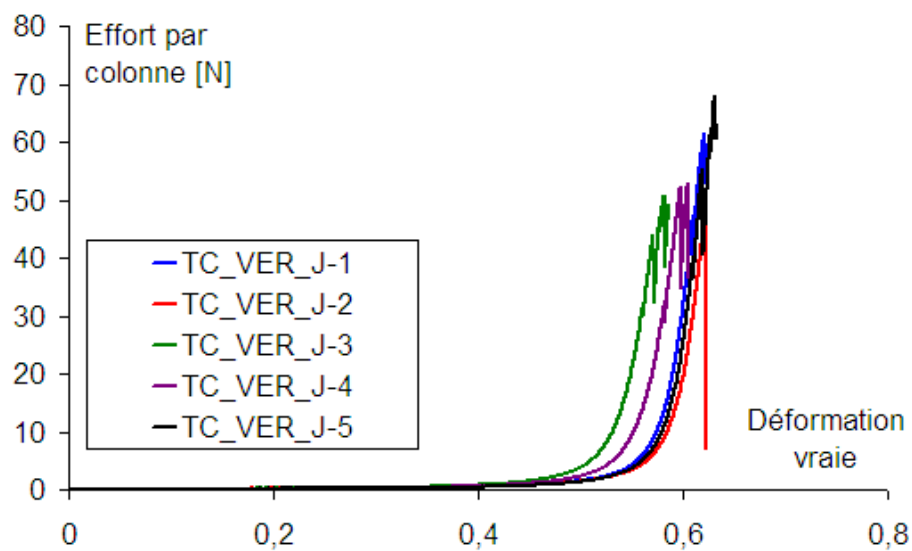


Figure B.3 – Traction colonne Verre Jersey

B.4 Traction rangée sur tricots jersey en fibres de verre

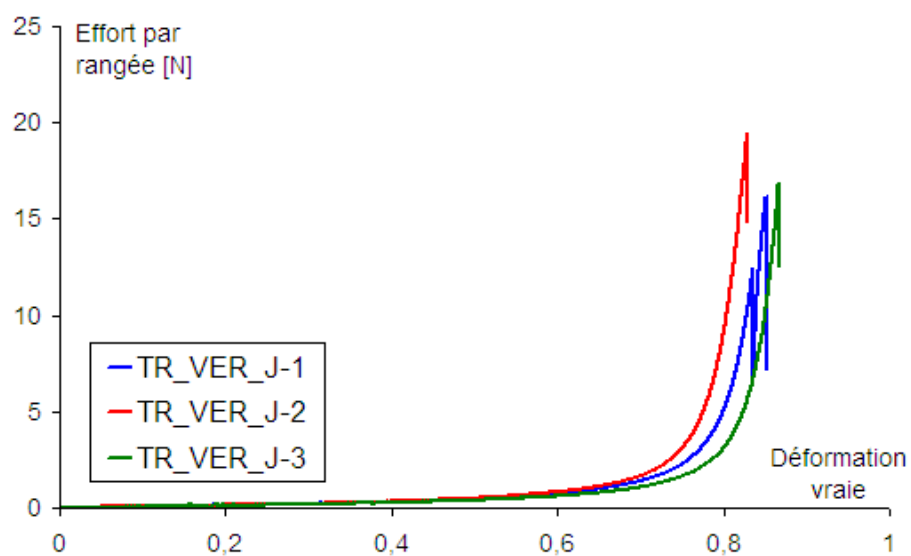


Figure B.4 – Traction colonne Verre Jersey

B.5 Traction colonne sur tricots côte en fibres de basalte

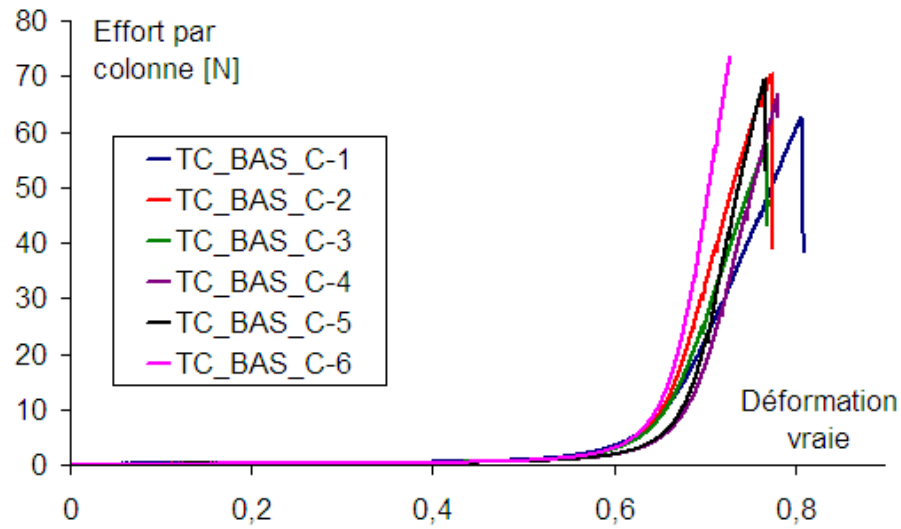


Figure B.5 – Traction colonne Basalte Côte

B.6 Traction rangée sur tricots côte en fibres de basalte

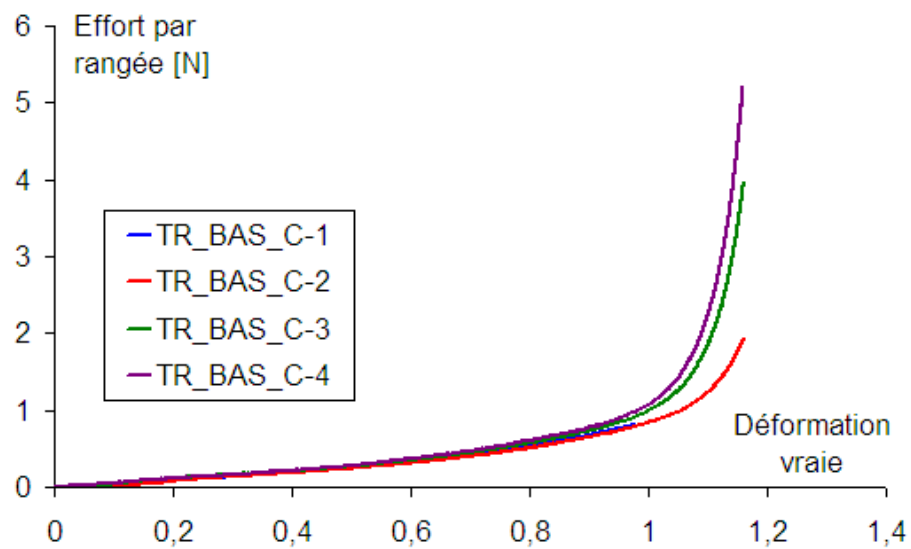
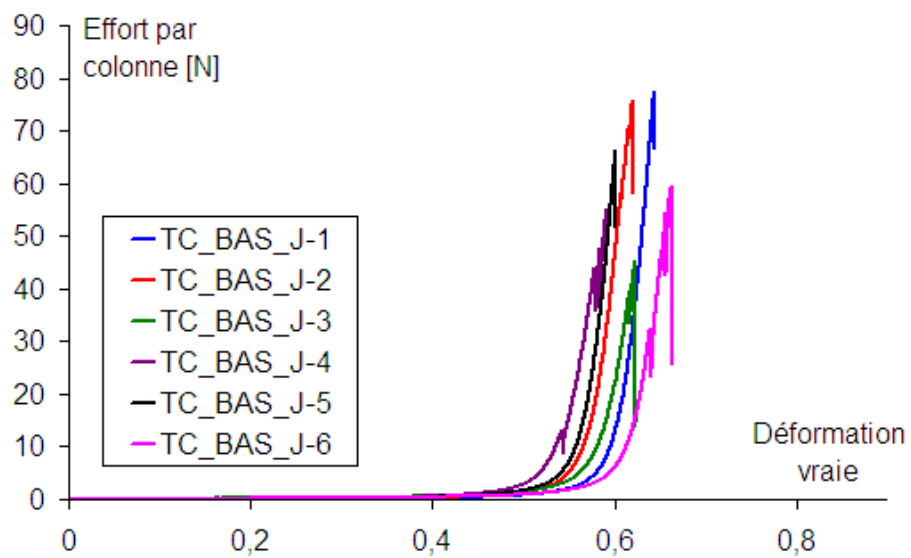
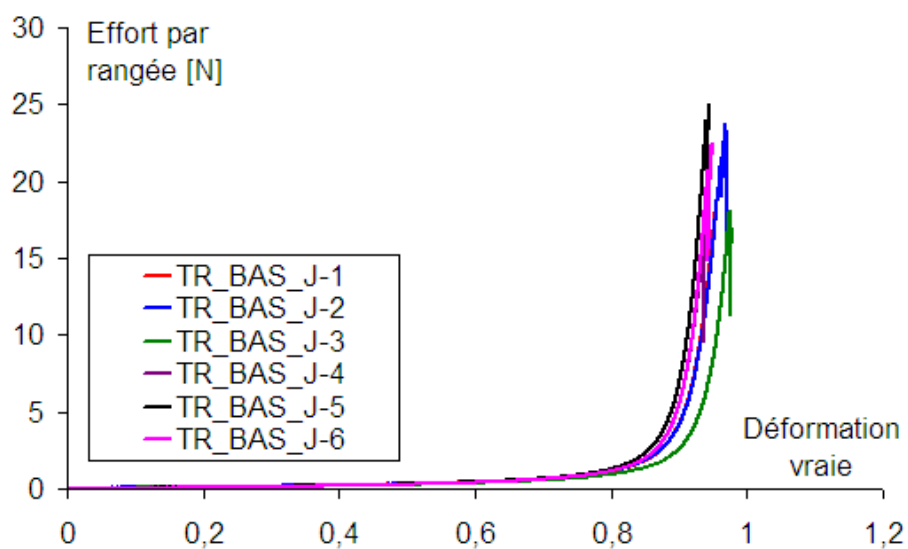


Figure B.6 – Traction rangée Basalte Côte

B.7 Traction colonne sur tricots jersey en fibres de basalte**Figure B.7** – *Traction colonne Basalte Jersey***B.8 Traction rangée sur tricots jersey en fibres de basalte****Figure B.8** – *Traction rangée Basalte Jersey*

B.9 Traction colonne sur tricots côte en fibres de carbone

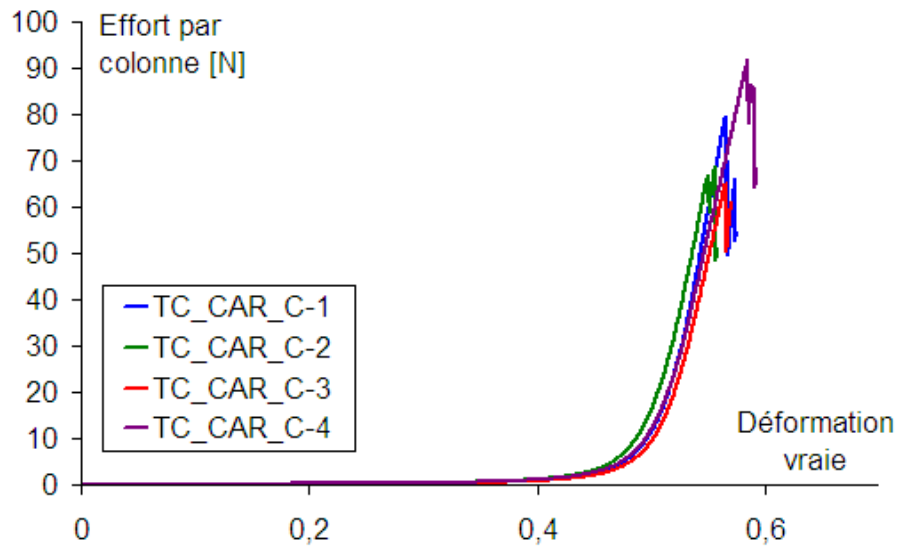


Figure B.9 – Traction colonne Carbone Côte

B.10 Traction rangée sur tricots côte en fibres de carbone

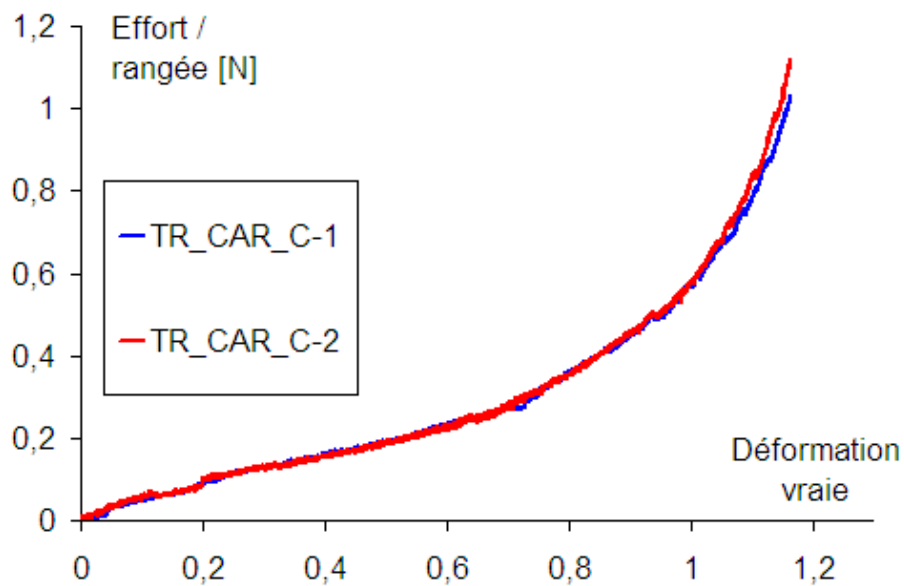
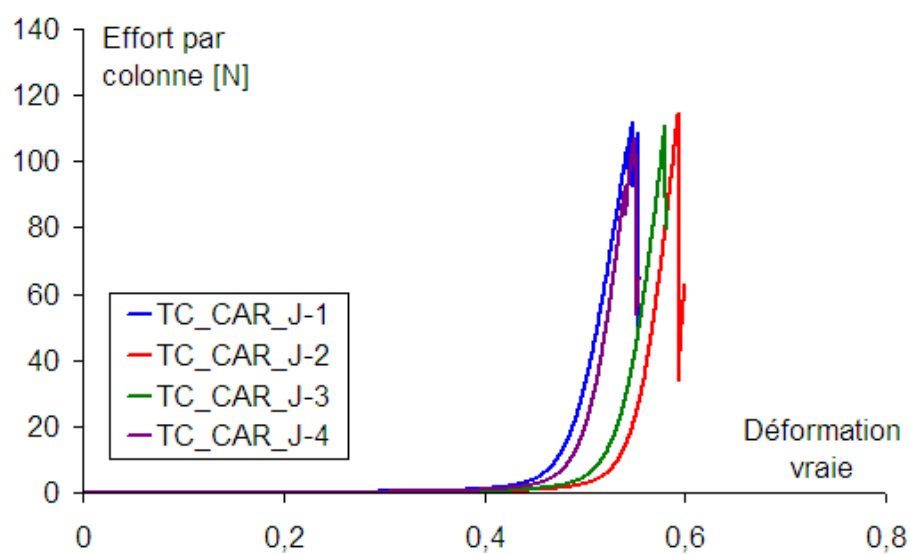
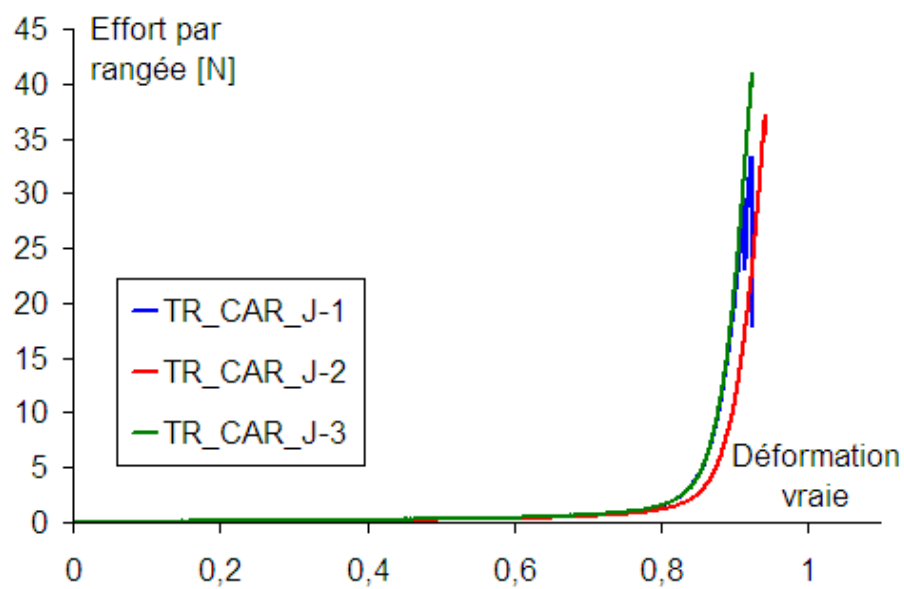


Figure B.10 – Traction rangée Carbone Jersey

B.11 Traction colonne sur tricots jersey en fibres de carbone**Figure B.11** – *Traction colonne Carbone Côte***B.12** Traction rangée sur tricots jersey en fibres de carbone**Figure B.12** – *Traction rangée Carbone Jersey*

C Courbes expérimentales de traction sur les tricots secs JC

C.1 Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre

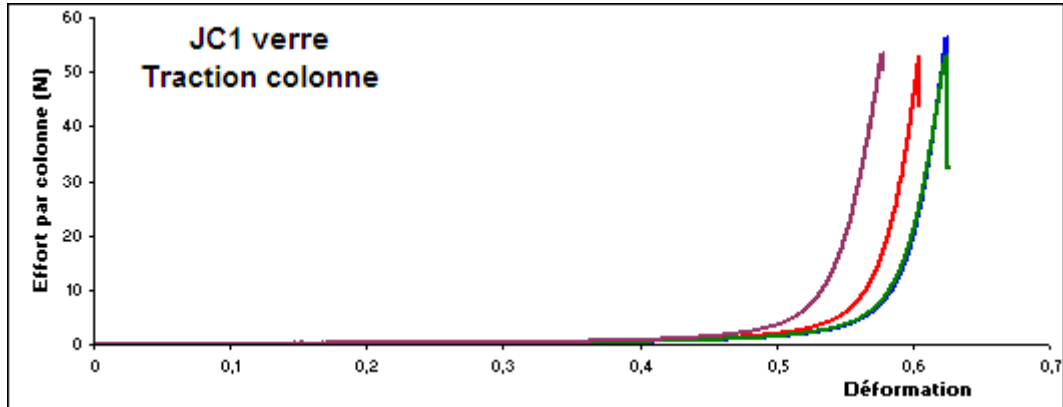


Figure C.1 – Traction colonne verre JC1

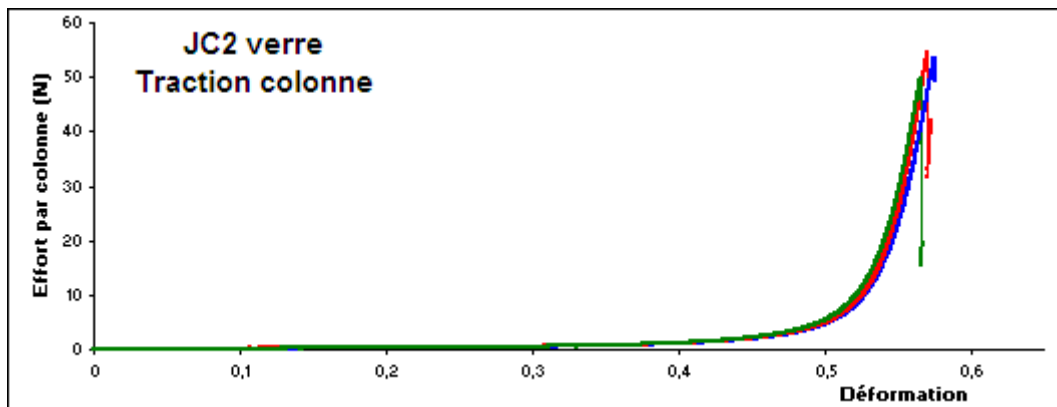


Figure C.2 – Traction colonne verre JC2

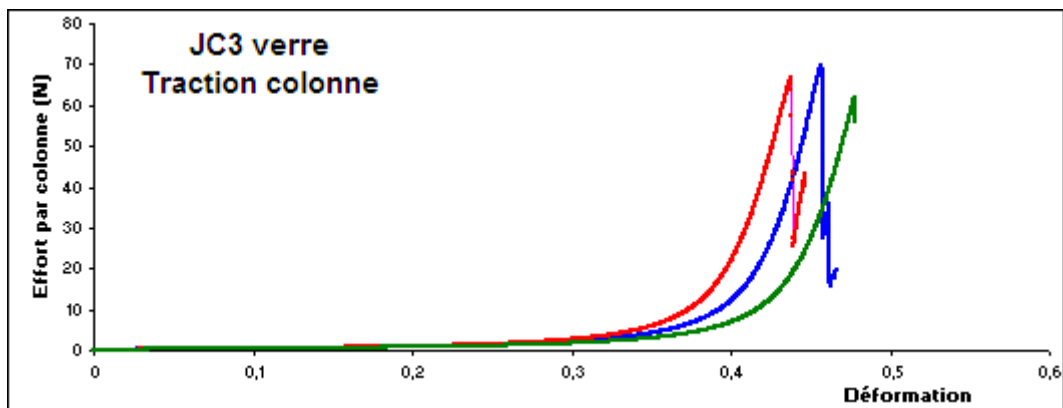


Figure C.3 – Traction colonne verre JC3

C.2 Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de verre

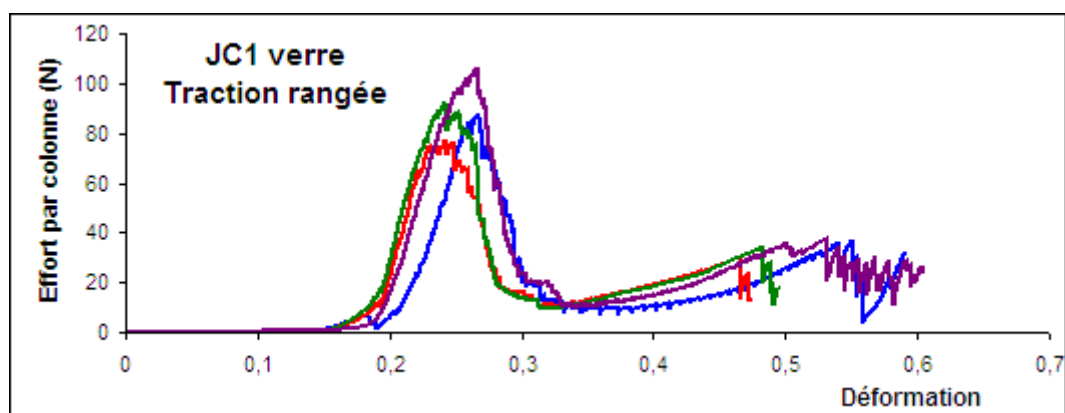


Figure C.4 – Traction rangée verre JC1

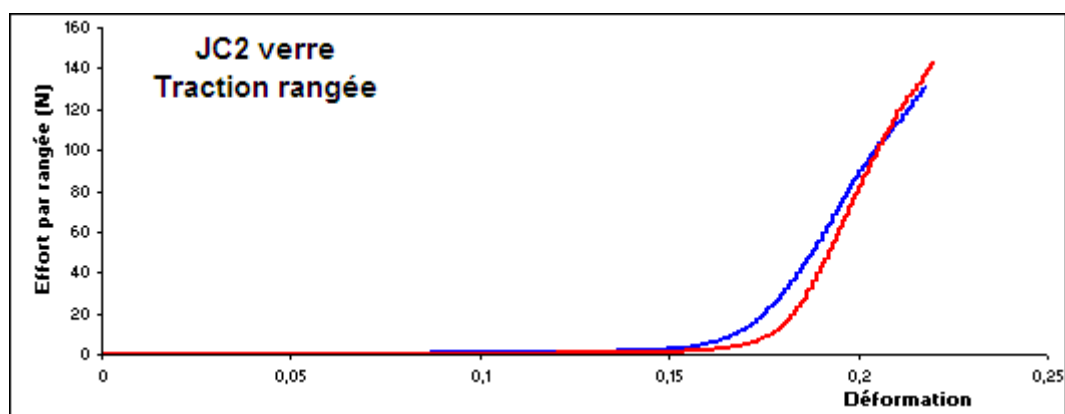


Figure C.5 – Traction rangée verre JC2

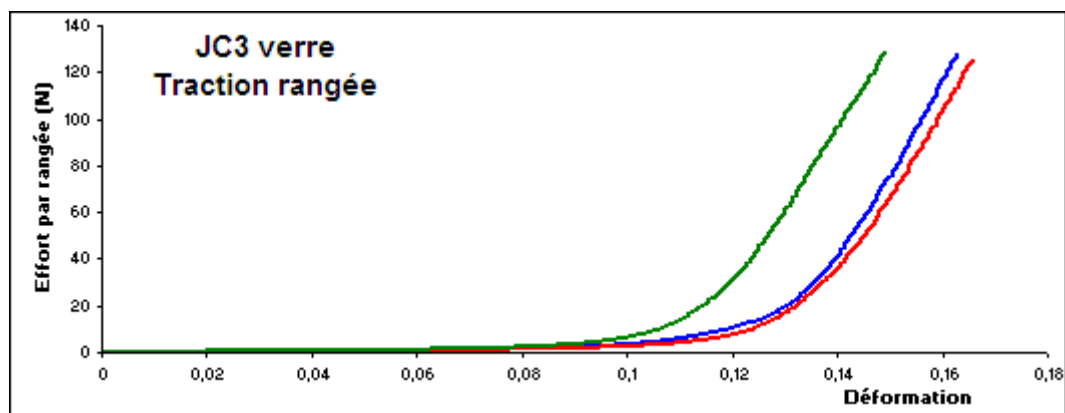


Figure C.6 – Traction rangée verre JC3

C.3 Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de basalte

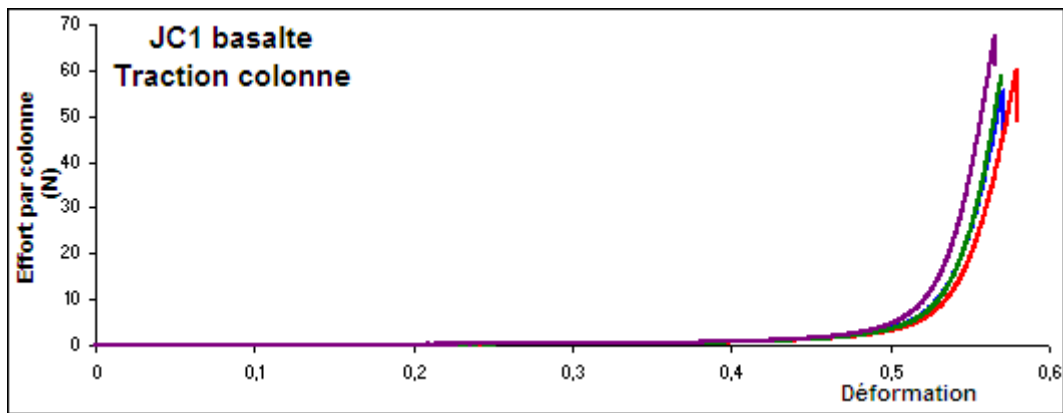


Figure C.7 – Traction colonne basalte JC1

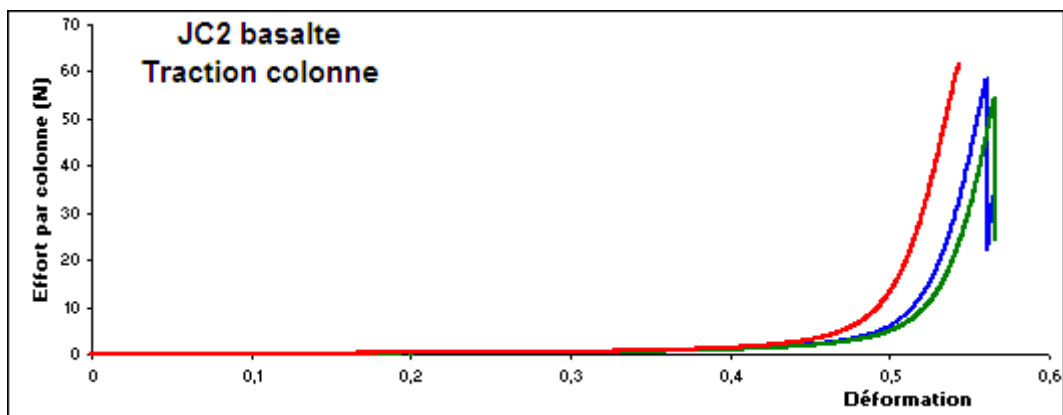


Figure C.8 – Traction colonne basalte JC2

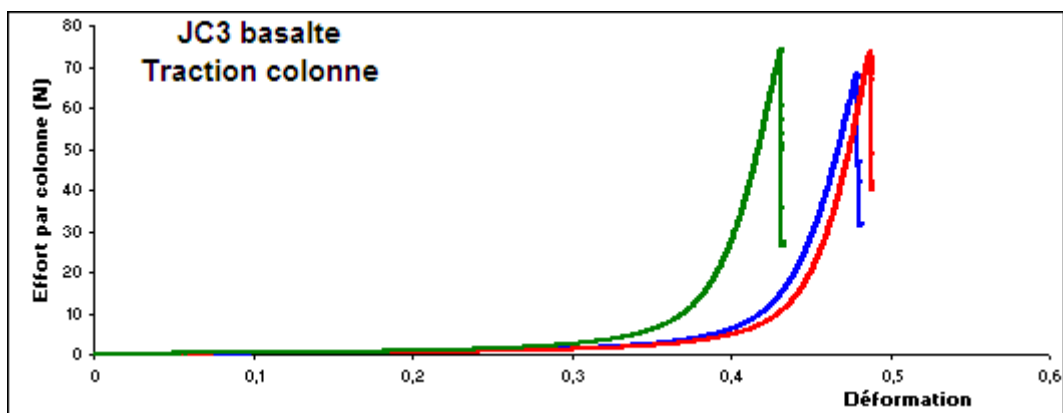


Figure C.9 – Traction colonne basalte JC3

C.4 Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de basalte

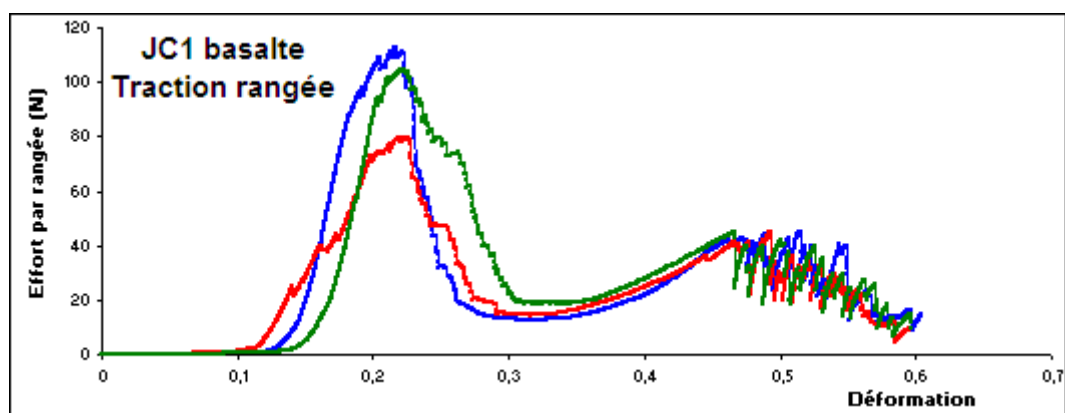


Figure C.10 – Traction rangée basalte JC1

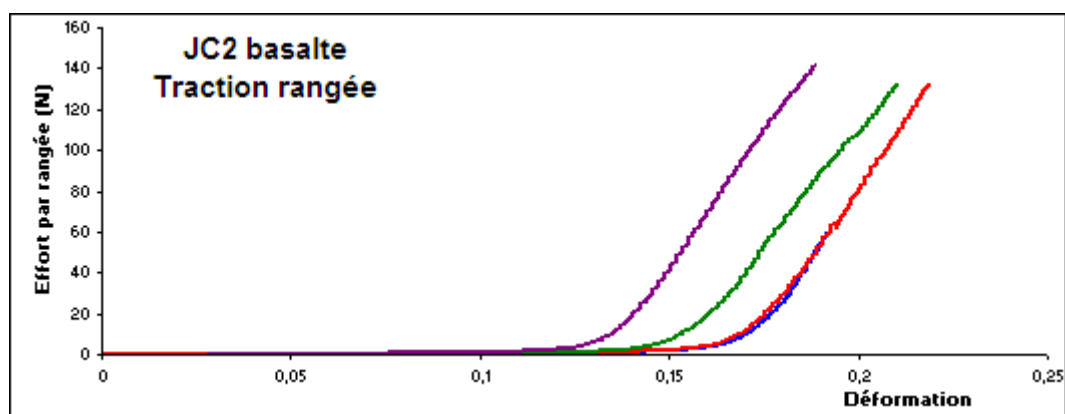


Figure C.11 – Traction rangée basalte JC2

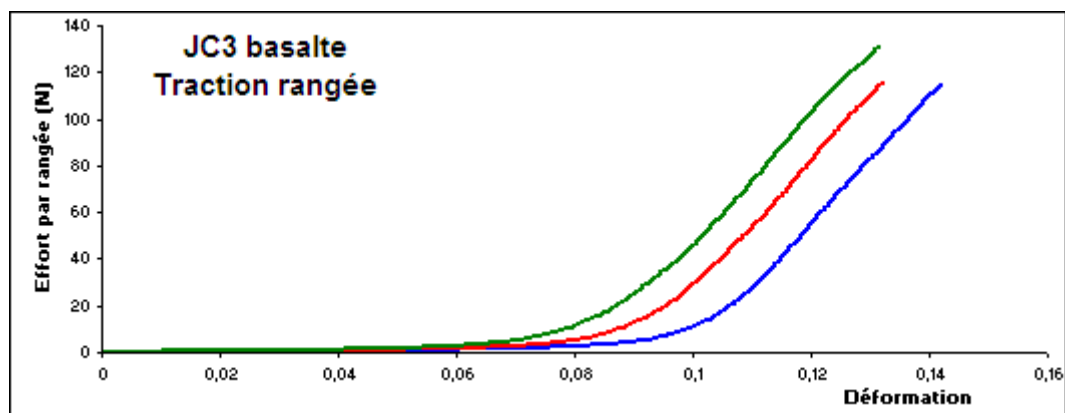


Figure C.12 – Traction rangée basalte JC3

C.5 Traction colonne sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de carbone

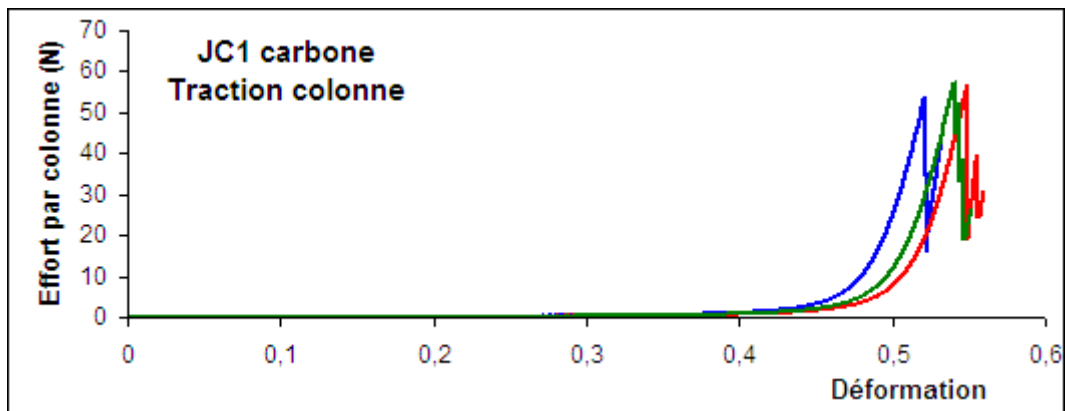


Figure C.13 – Traction colonne carbone JC1

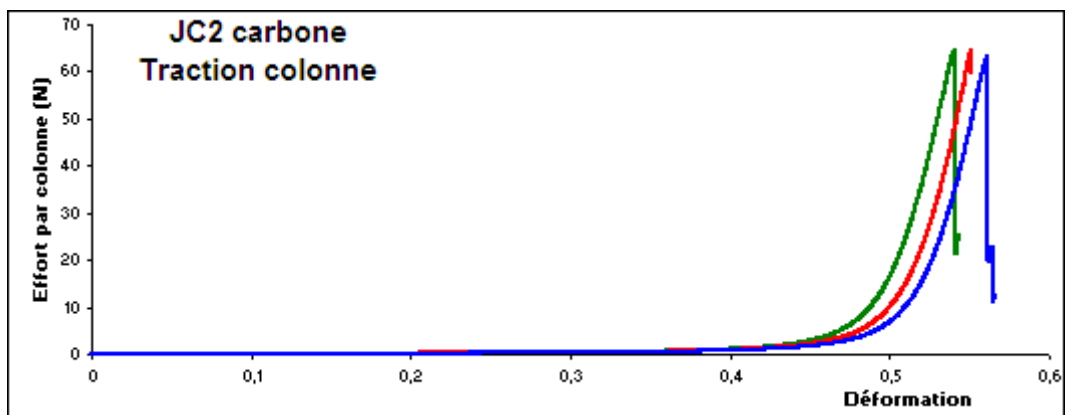


Figure C.14 – Traction colonne carbone JC2

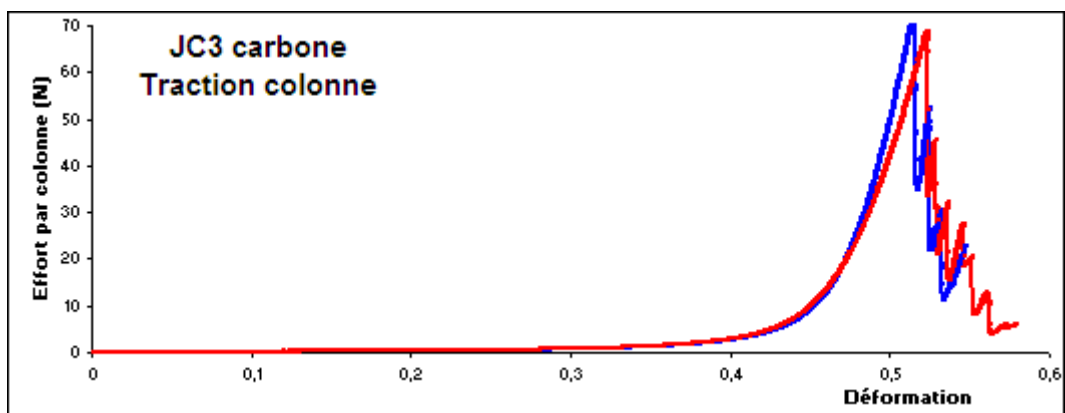


Figure C.15 – Traction colonne carbone JC3

C.6 Traction rangée sur tricots JC1, JC2 et JC3 en fibres de carbone

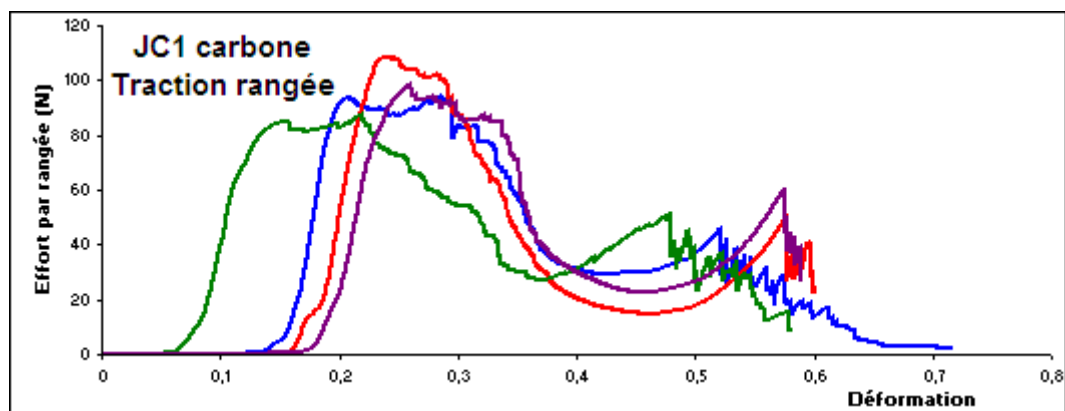


Figure C.16 – Traction rangée carbone JC1

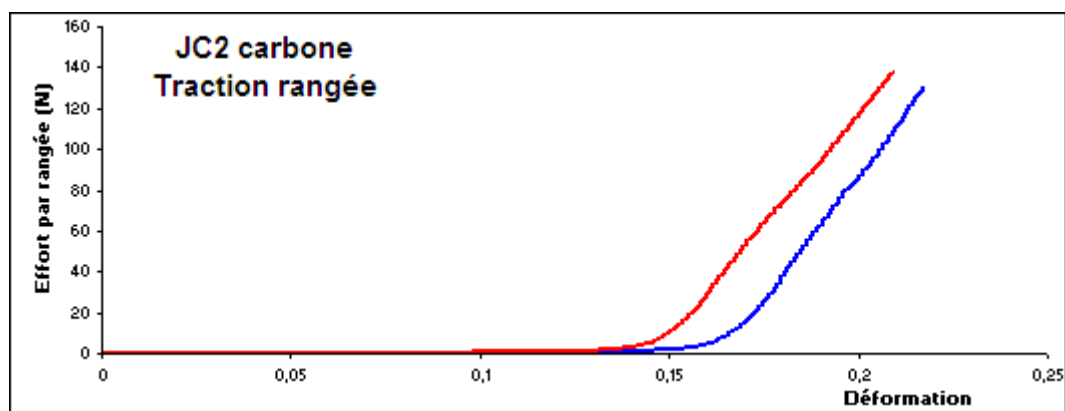


Figure C.17 – Traction rangée carbone JC2

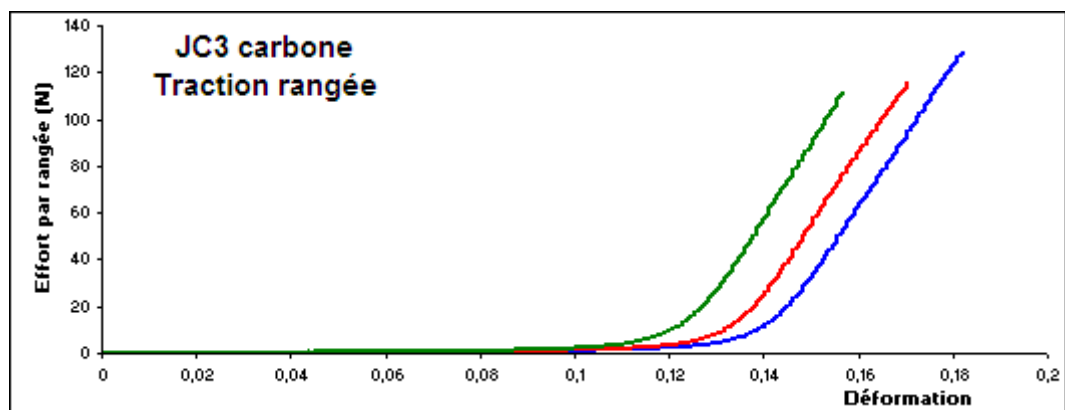


Figure C.18 – Traction rangée carbone JC3

D Résultats des mesures de viscosité effectuées sur le mélange de résine *SR1710 + SD8822*

Des mesures de viscosité dynamique ont été réalisées sur la résine pour suivre son évolution en fonction du temps à des températures données. Les mesures sont réalisées avec un rhéomètre HAAKE MARS (Modular Advanced Rheometer System) équipé d'un four régulé à l'air ou à l'azote et de plateaux de géométries plan/plan de 40 *mm* de diamètre. Les essais sont réalisés à température constante en imposant une vitesse de cisaillement et la contrainte de cisaillement est mesurée à l'aide d'un capteur de force. Les résultats représentés à la figure D.1 donnent la viscosité en fonction du temps pour deux températures différentes (20°C et 80°C).

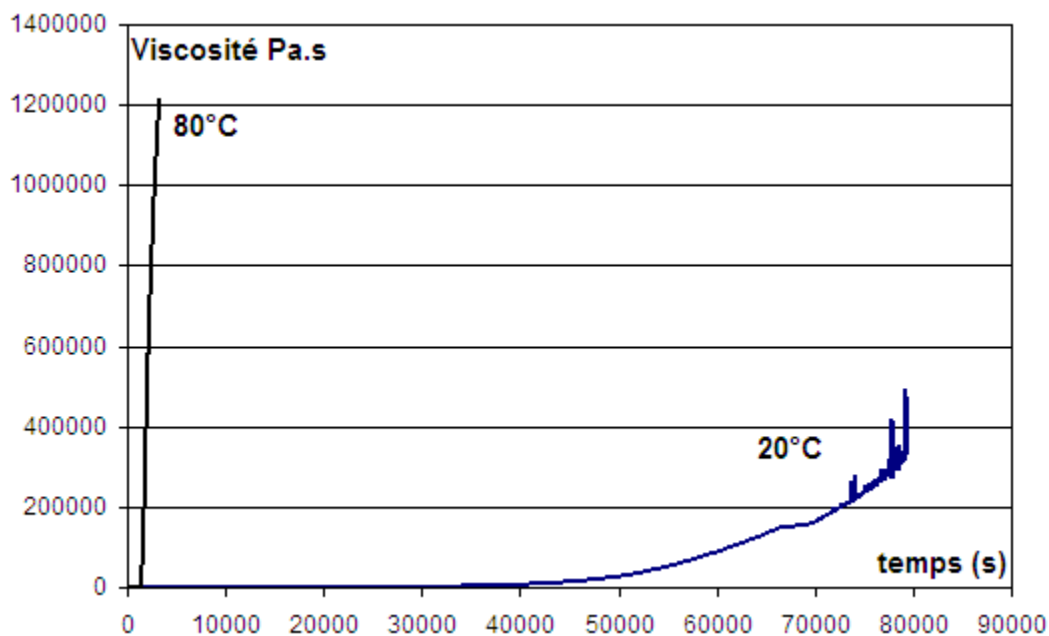


Figure D.1 – Courbes donnant la viscosité du mélange de résine en fonction du temps pour des essais réalisés à 20°C et 80°C

E Principe de la stéréo-corrélation d'images

La stéréo-corrélation d'images est une méthode optique non intrusive de mesure de formes 3D et de champs de déformation sur la surface d'un objet. Elle est basée sur le principe de la corrélation d'images qui permet de mesurer des champs de déformation couplé au principe de la stéréo-vision qui permet de mesurer la forme 3D d'un objet.

E.1 La corrélation d'images numériques 2D :

Son principe est basé sur le fait que la déformation de la surface d'un objet est identique à la déformation de l'image que l'on peut prendre de cet objet au cours du temps [88]. Cette méthode de mesure de champs de déformation consiste à suivre le déplacement de marqueurs à la surface de l'éprouvette et, pour ce faire, les objets doivent présenter une surface avec une texture aléatoire. Au cours de la déformation de l'éprouvette, le motif adhérent à la surface suivra la déformation de celle-ci. Il est alors possible, à l'aide d'une caméra CCD, d'enregistrer la position des points à un instant t et, grâce à un logiciel de corrélation d'images, de remonter au vecteur déplacement de chacun d'eux et ainsi à une mesure du champ de déplacement en un grand nombre de points de la surface. On peut ensuite en déduire une estimation du champ de déformation sur la surface de l'échantillon.

La corrélation d'image consiste donc à :

- Acquérir au moins deux images d'un même objet à deux états différents (état initial et état déformé).
- Associer des points homologues sur ces deux images en se basant sur la ressemblance de leur voisinage (codé en niveaux de gris).
- En déduire le champ de déplacement des points dans les images (appelé disparité) puis, par dérivation discrète, le champ de déformation.

E.2 La stéréo-corrélation d'images numériques :

La stéréo-corrélation d'images permet de mesurer des champs de déformations sur la surface d'un objet 3D. La forme 3D d'un objet est mesurée à partir d'une paire d'images prise à l'aide d'un capteur composé de deux caméras liées rigidement (banc de stéréo-vision) [89]. En utilisant deux caméras numériques, deux images stéréoscopiques d'un même objet prises sous deux angles différents sont enregistrées. Si le banc est étalonné, une information spatiale 3D est calculée par triangulation dont le principe est décrit à la figure E.1. La position d'un point M d'un objet dans l'espace est déterminée à partir [88] :

- de ses projections respectives m et m' dans les images gauche et droite, positions obtenues par appariement entre les images gauche et droite par corrélation d'images ;
- de la connaissance de la géométrie du système stéréoscopique obtenue par une procédure de calibrage, et qui permet ensuite par triangulation de déterminer les coordonnées tridimensionnelles du point M .

La stéréo-corrélation d'images numériques consiste à (Figure E.2) :

- acquérir deux paires d'images d'un même objet à deux instants t et $t + \delta t$ à l'aide de deux caméras,
- réaliser un appariement par stéréo-corrélation pour reconstruire l'objet à chacun des deux instants par le principe de triangulation,
- réaliser un appariement temporel entre les différentes paires d'images stéréoscopiques,

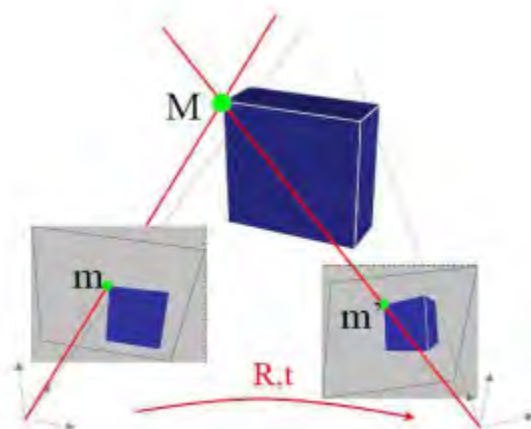


Figure E.1 – *Reconstruction 3D - Principe de la triangulation [89]*

- en déduire le champ de déplacement des points dans les images puis, par dérivation discrète, le champ de déformation.

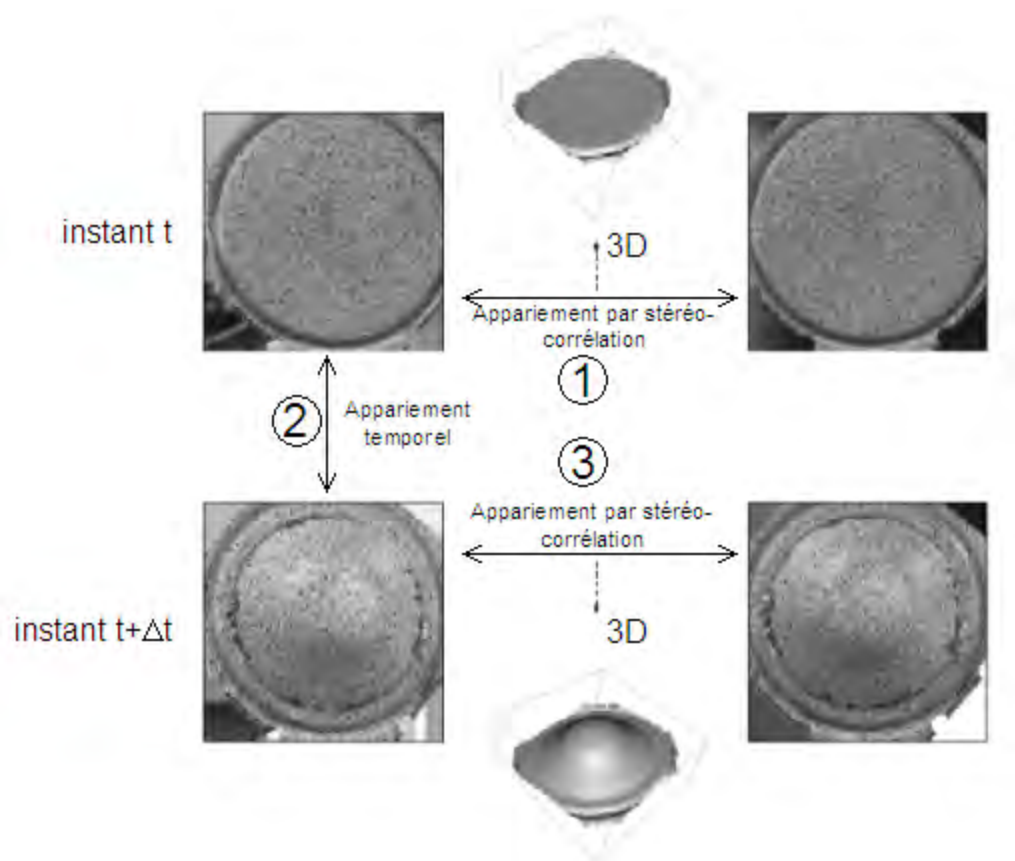


Figure E.2 – *Principe de la stéréo-corrélation [89]*

La stéréo-corrélation d'images nécessite donc un calibrage des caméras.

E.3 Le calibrage du système stéréoscopique :

Le calibrage consiste à déterminer les paramètres intrinsèques du système stéréoscopique. Calibrer un capteur de stéréovision, constitué de deux caméras liées de façon rigide, consiste à déterminer les paramètres intrinsèques de chacune des caméras, et la position et orientation relative de ces deux caméras [90]. Ces paramètres de calibrage sont nécessaires pour calculer, par triangulation, les coordonnées tridimensionnelles d'un point correspondant à des pixels appariés dans les deux images. La méthodologie de calibrage consiste à acquérir N paires d'images stéréoscopiques d'une mire connue sous différentes orientations et d'en extraire les points caractéristiques (Figure E.3). L'estimation des paramètres du système stéréoscopique s'effectue par une méthode d'optimisation globale en minimisant la somme des erreurs quadratiques entre les coordonnées des points extraits dans les images et les coordonnées par le modèle de caméra pour chaque point de la mire [89].

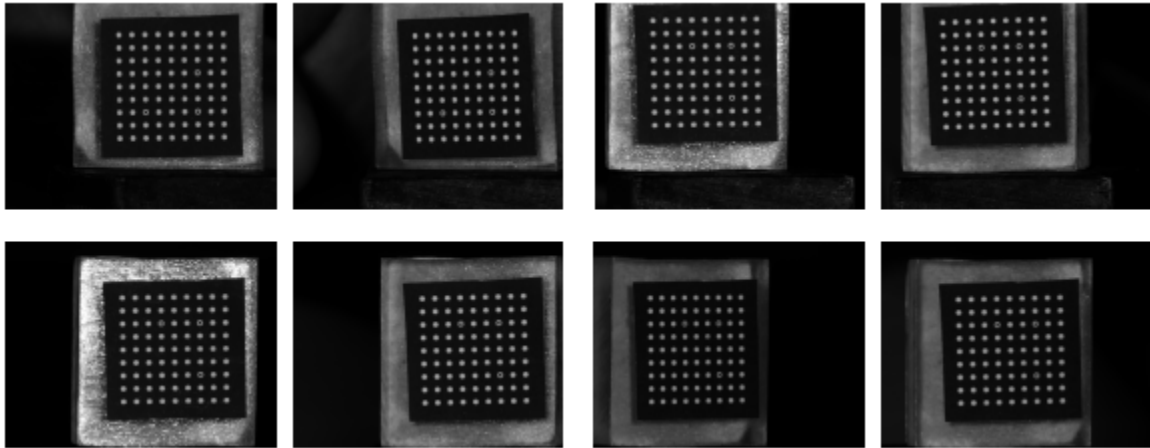


Figure E.3 — Exemple d'une séquence de 4 paires d'images d'une mire utilisée pour le calibrage d'un banc de stéréovision

F Résultats des essais de traction sur composites renforcés de tricots de contexture simple

F.1 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de verre à 0° , 45° et 90°

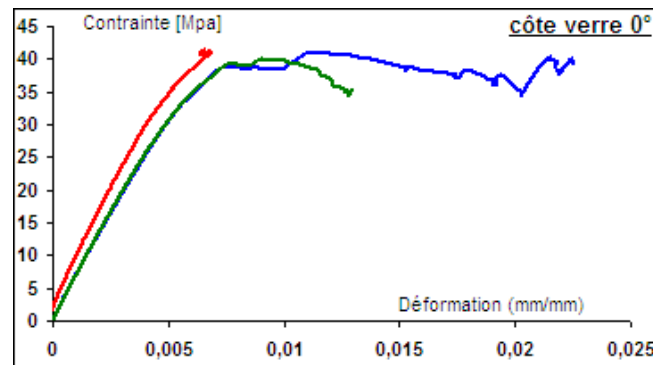


Figure F.1 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de verre sollicités à 0°

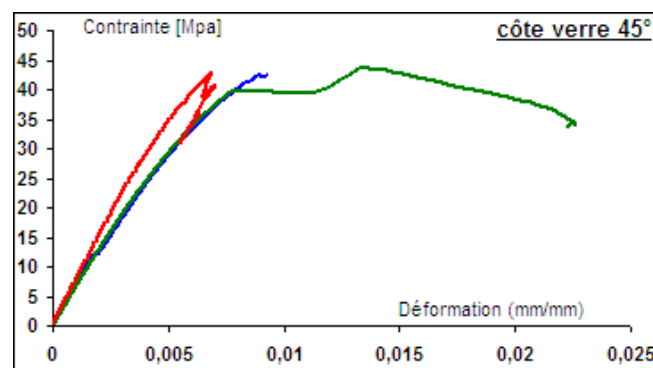


Figure F.2 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de verre sollicités à 45°

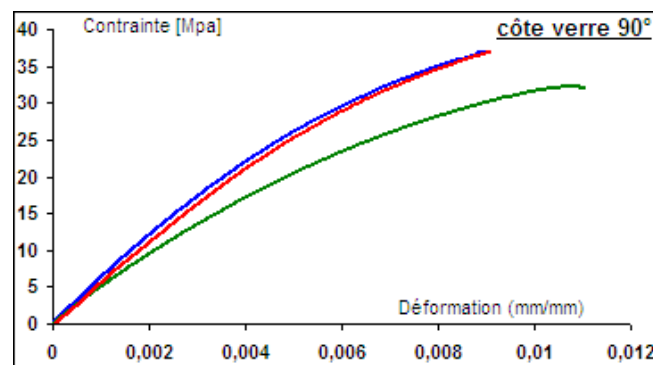


Figure F.3 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de verre sollicités à 90°

F.2 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de verre à 0° , 45° et 90°

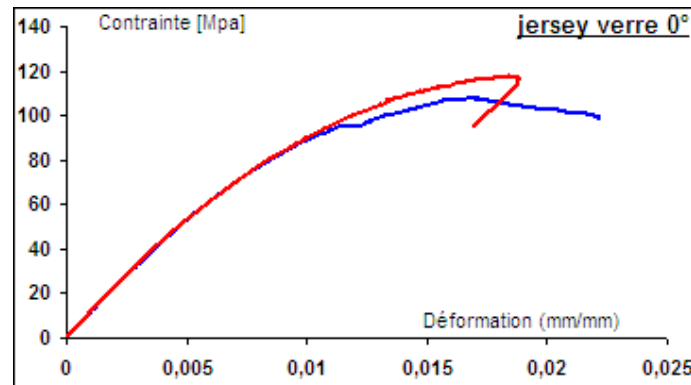


Figure F.4 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de verre sollicités à 0°

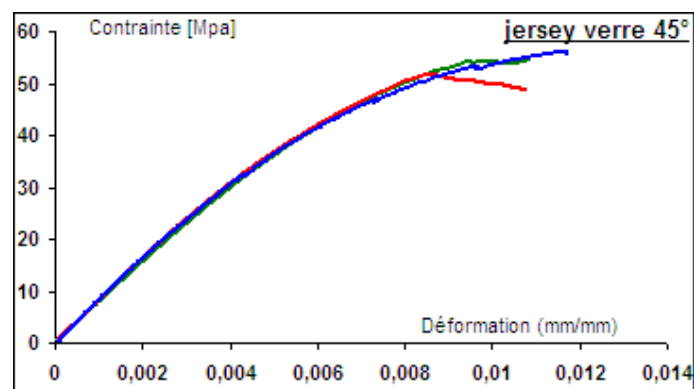


Figure F.5 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de verre sollicités à 45°

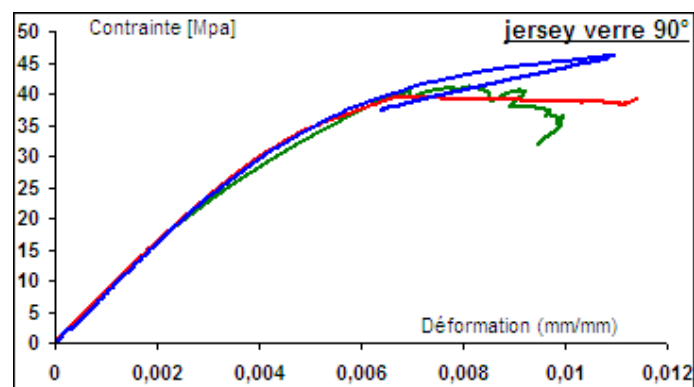


Figure F.6 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de verre sollicités à 90°

F.3 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°

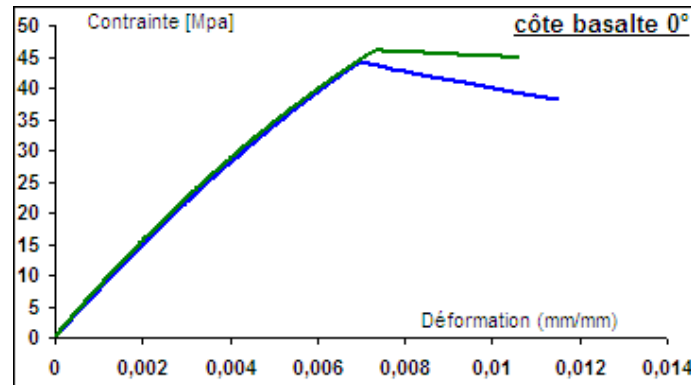


Figure F.7 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de basalte sollicités à 0°

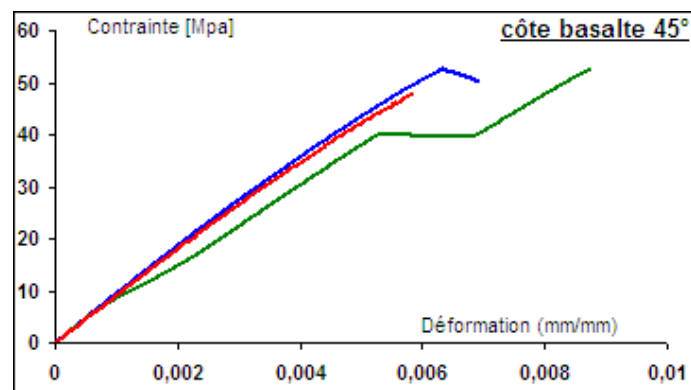


Figure F.8 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de basalte sollicités à 45°

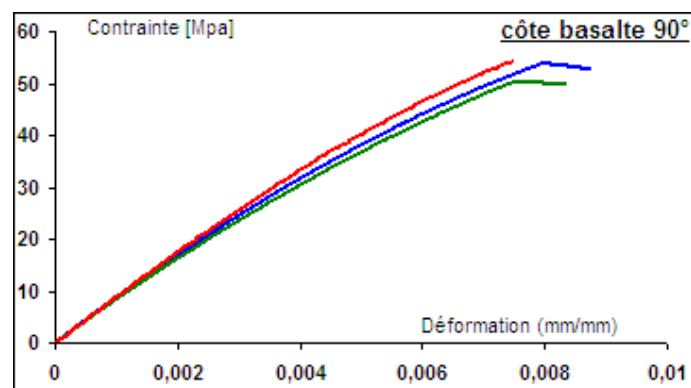


Figure F.9 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de basalte sollicités à 90°

F.4 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°

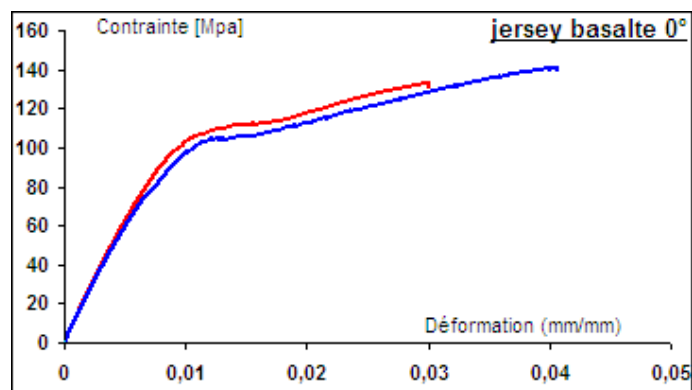


Figure F.10 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de basalte sollicités à 0°

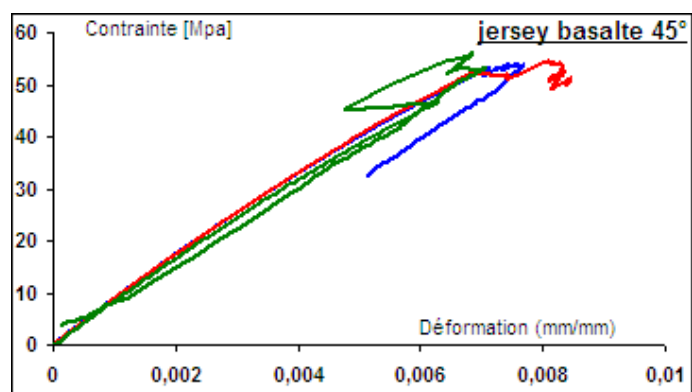


Figure F.11 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de basalte sollicités à 45°

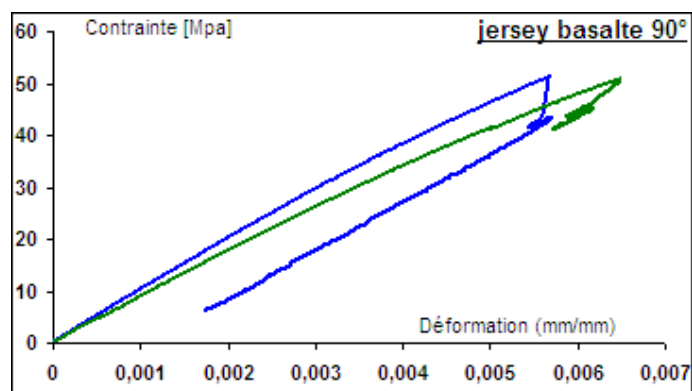


Figure F.12 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de basalte sollicités à 90°

F.5 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot côte en fibres de carbone à 0° , 45° et 90°

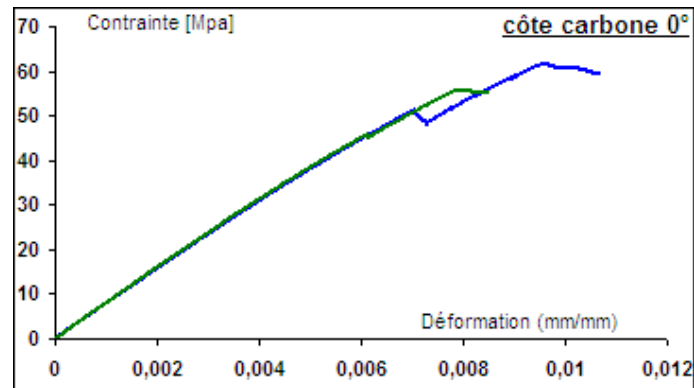


Figure F.13 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de carbone sollicités à 0°

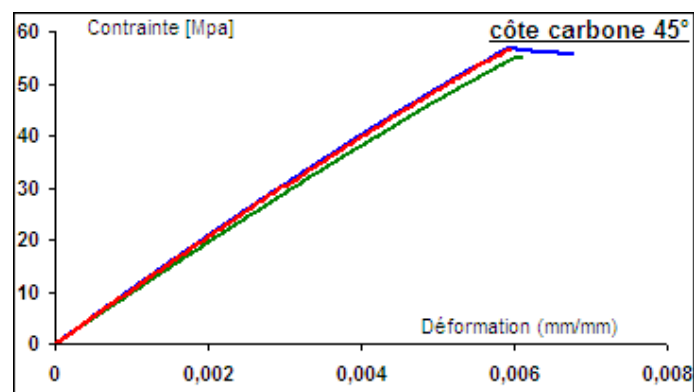


Figure F.14 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de carbone sollicités à 45°

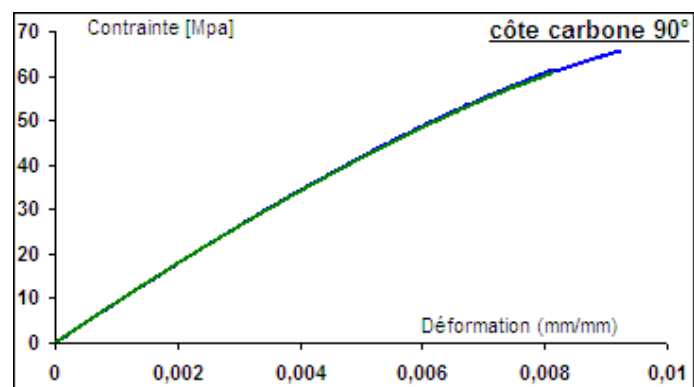


Figure F.15 – Courbes de comportement des composites côte en fibres de carbone sollicités à 90°

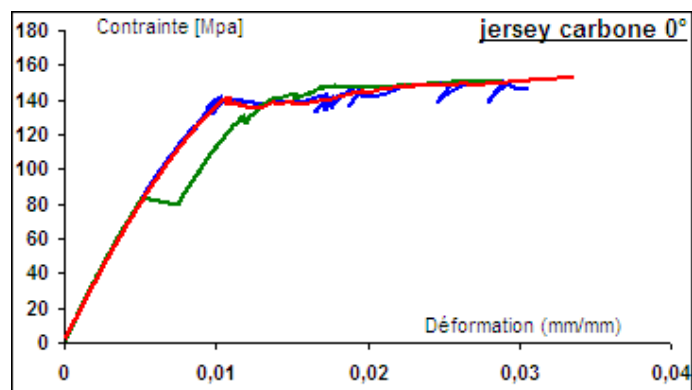
F.6 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot jersey en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°

Figure F.16 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de carbone sollicités à 0°

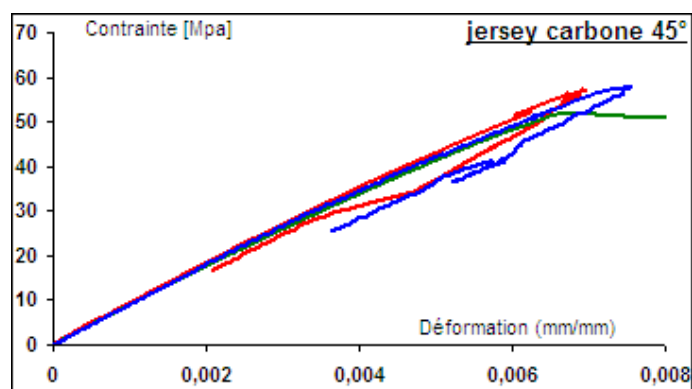


Figure F.17 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de carbone sollicités à 45°

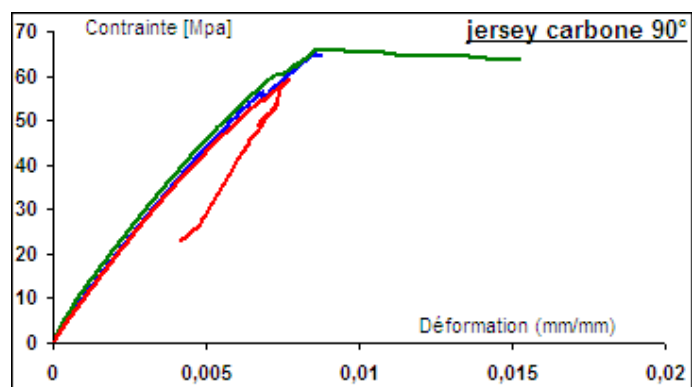


Figure F.18 – Courbes de comportement des composites jersey en fibres de carbone sollicités à 90°

G Résultats des essais de traction sur composites renforcés de tricot JC

G.1 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°

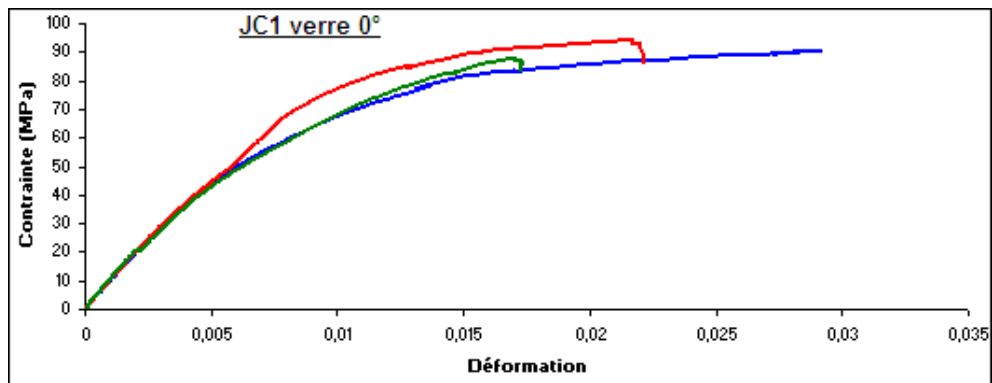


Figure G.1 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de verre sollicités à 0°

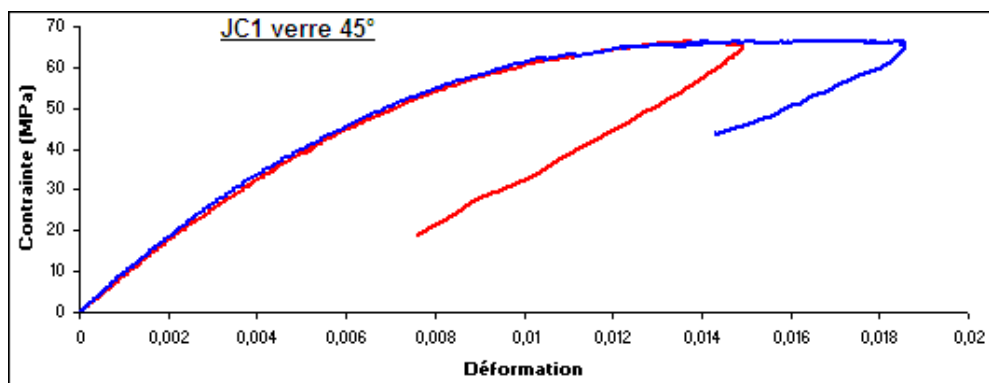


Figure G.2 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de verre sollicités à 45°

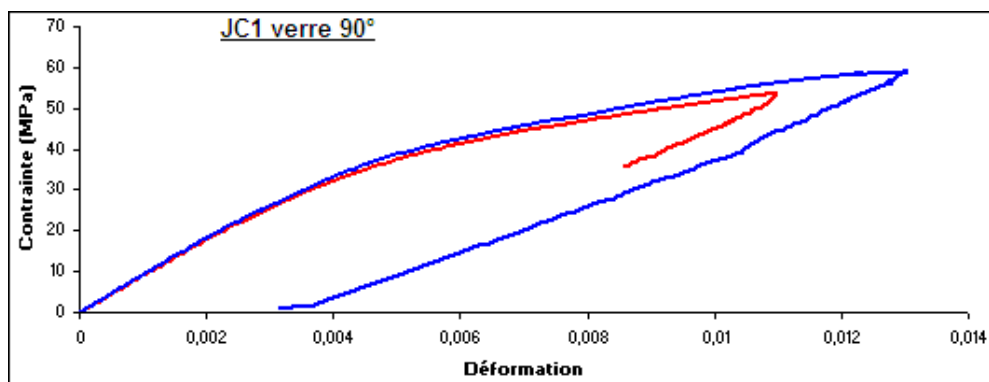


Figure G.3 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de verre sollicités à 90°

G.2 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°

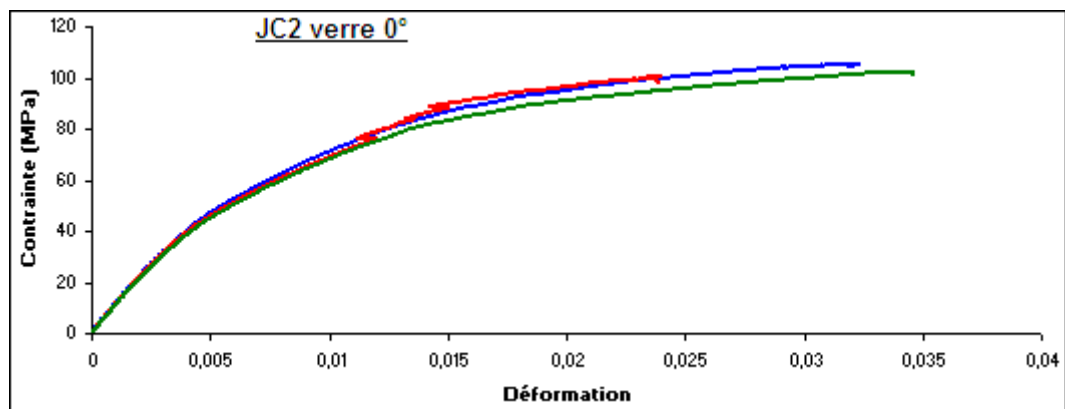


Figure G.4 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de verre sollicités à 0°

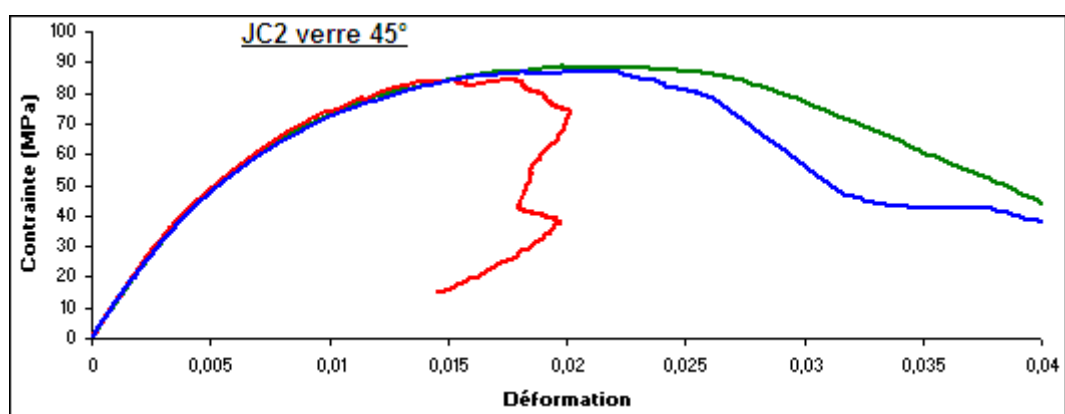


Figure G.5 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de verre sollicités à 45°

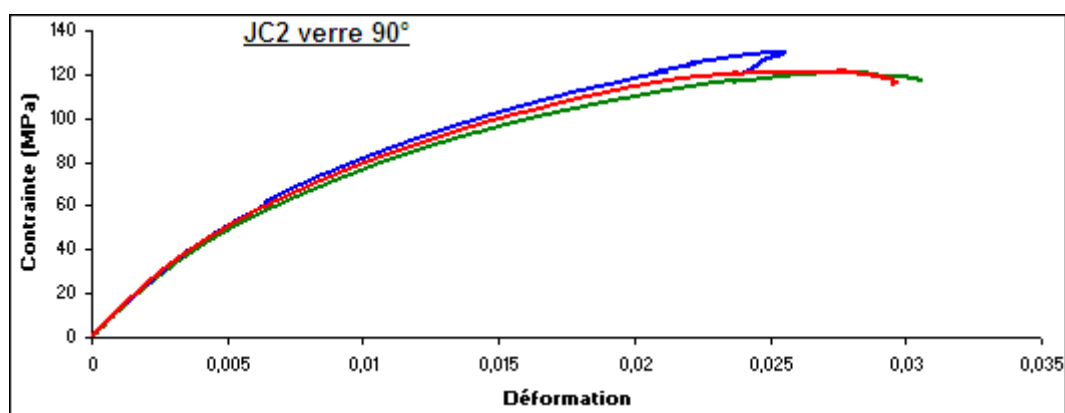


Figure G.6 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de verre sollicités à 90°

G.3 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de verre à 0°, 45° et 90°

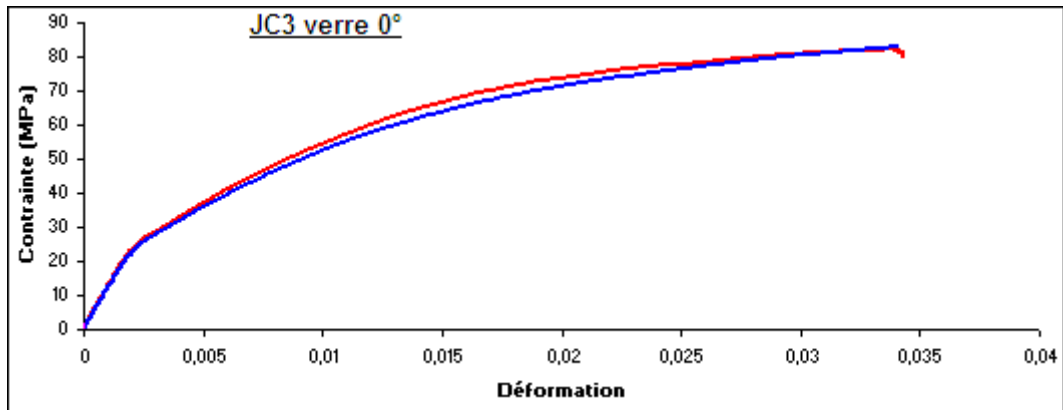


Figure G.7 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de verre sollicités à 0°

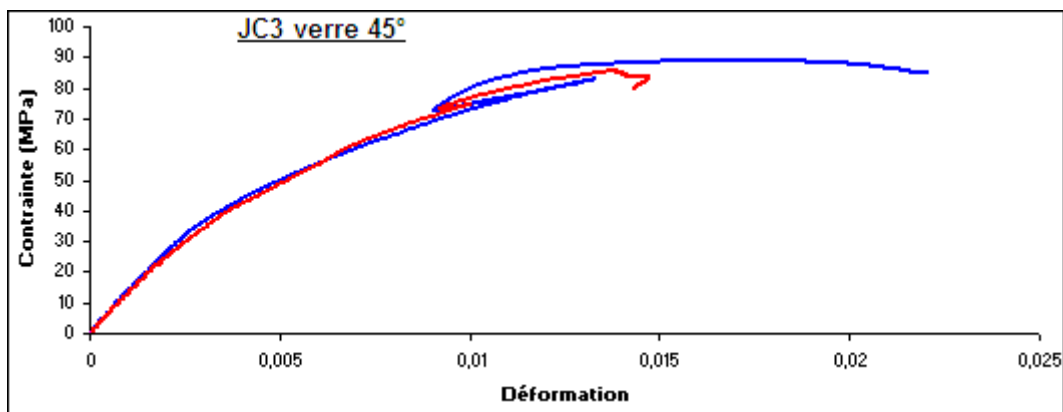


Figure G.8 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de verre sollicités à 45°

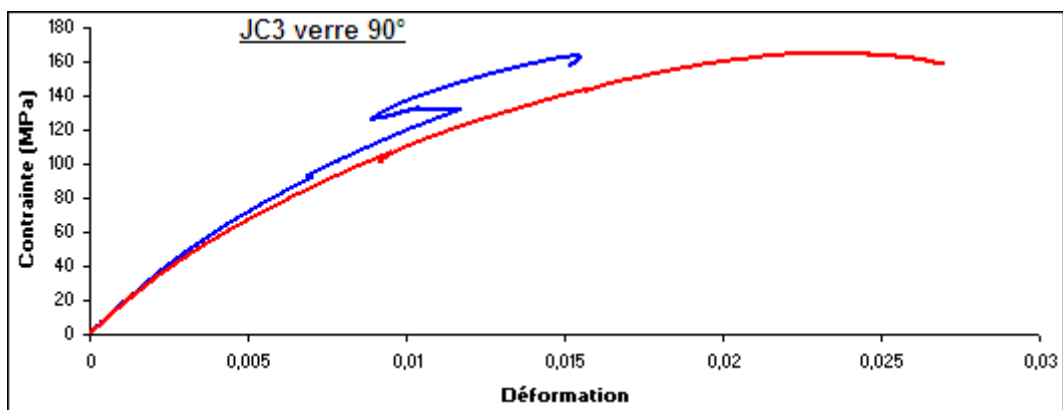


Figure G.9 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de verre sollicités à 90°

G.4 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°

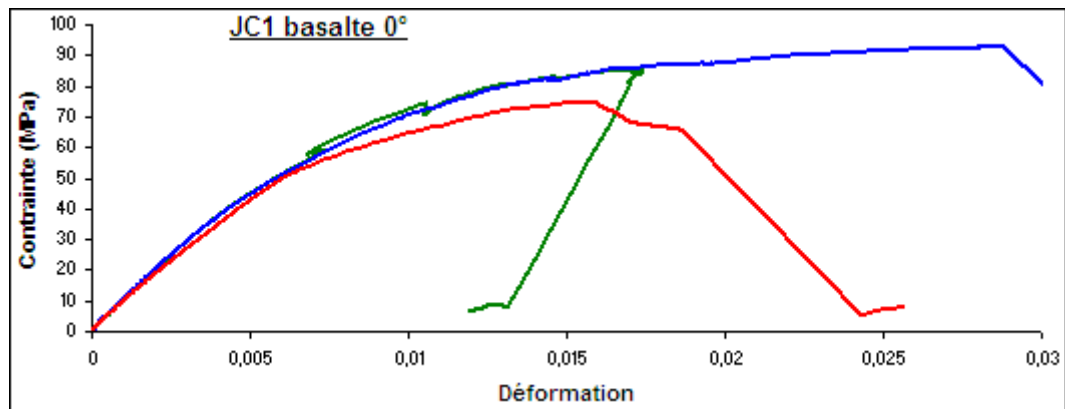


Figure G.10 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de basalte sollicités à 0°

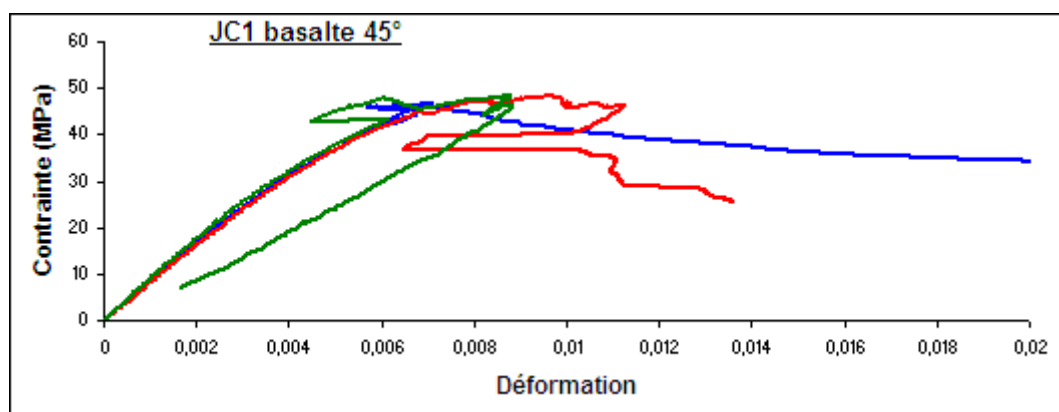


Figure G.11 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de basalte sollicités à 45°

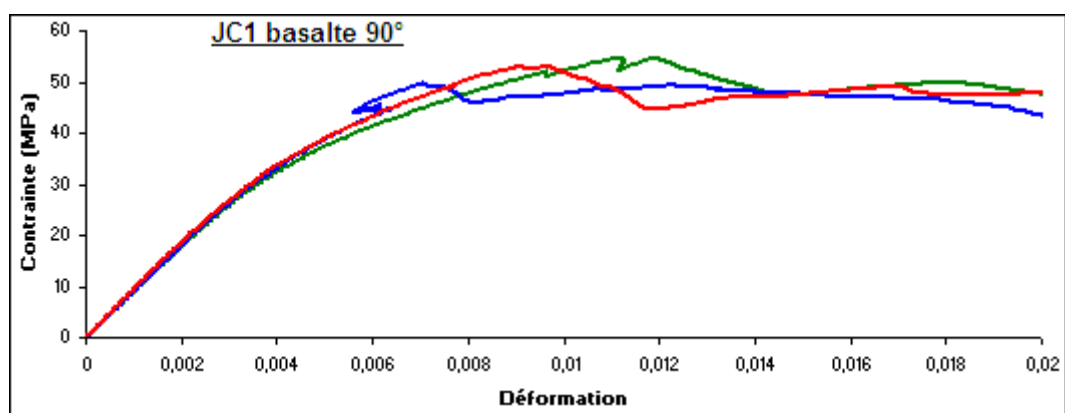


Figure G.12 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de basalte sollicités à 90°

G.5 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°

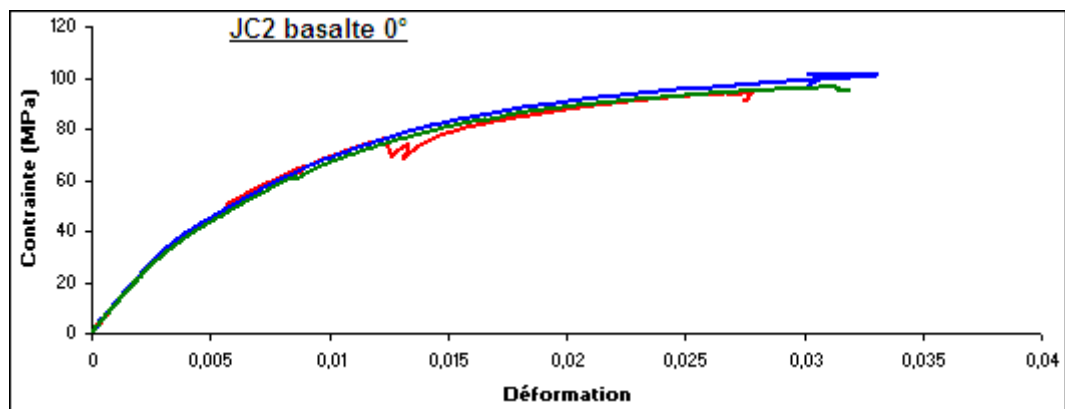


Figure G.13 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de basalte sollicités à 0°

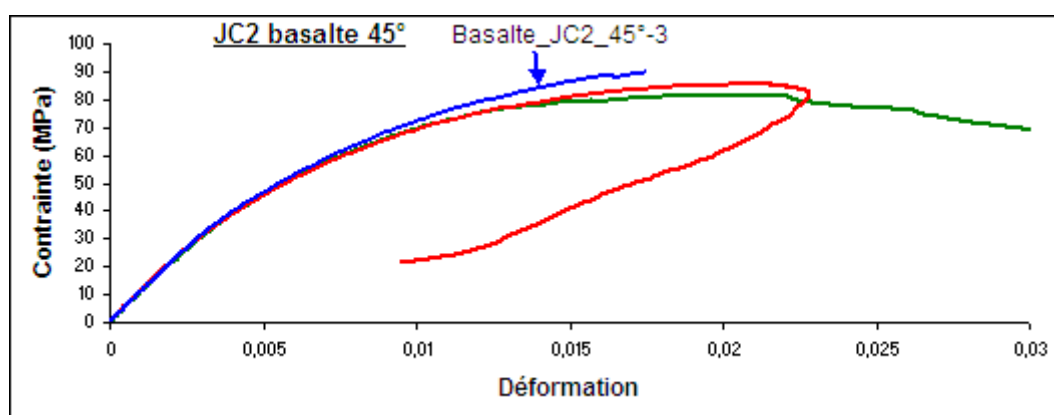


Figure G.14 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de basalte sollicités à 45°

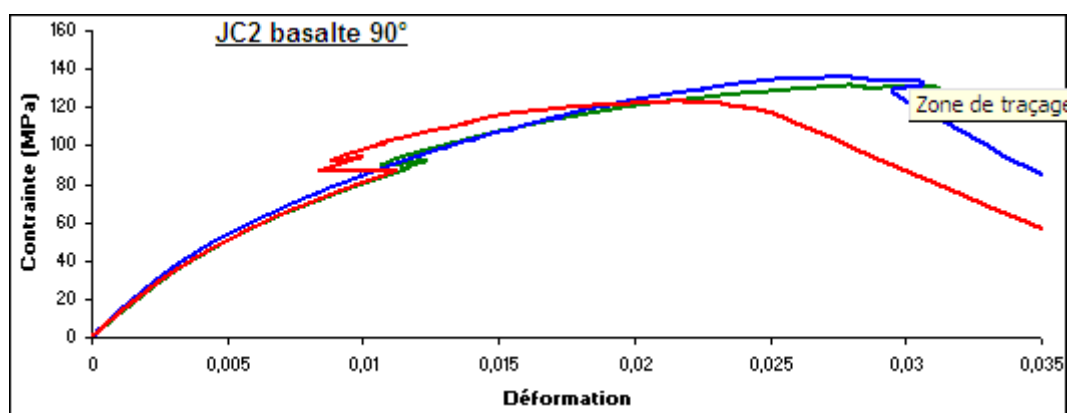


Figure G.15 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de basalte sollicités à 90°

G.6 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de basalte à 0°, 45° et 90°

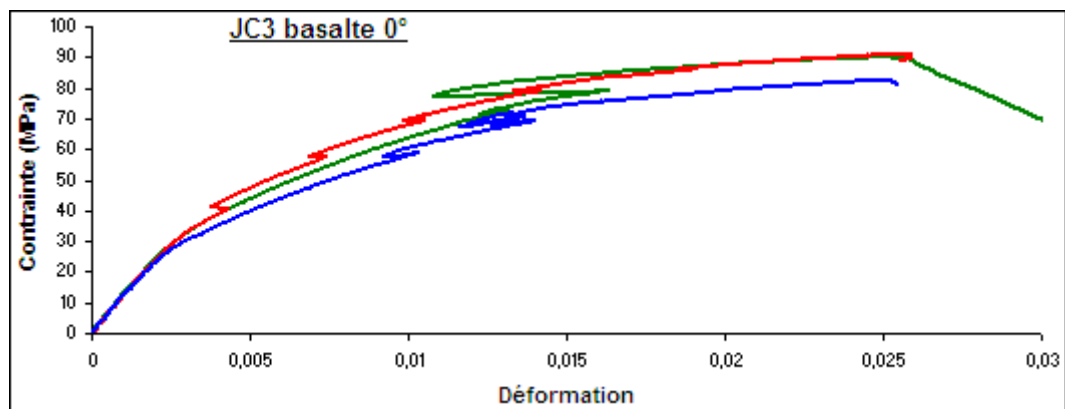


Figure G.16 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de basalte sollicités à 0°

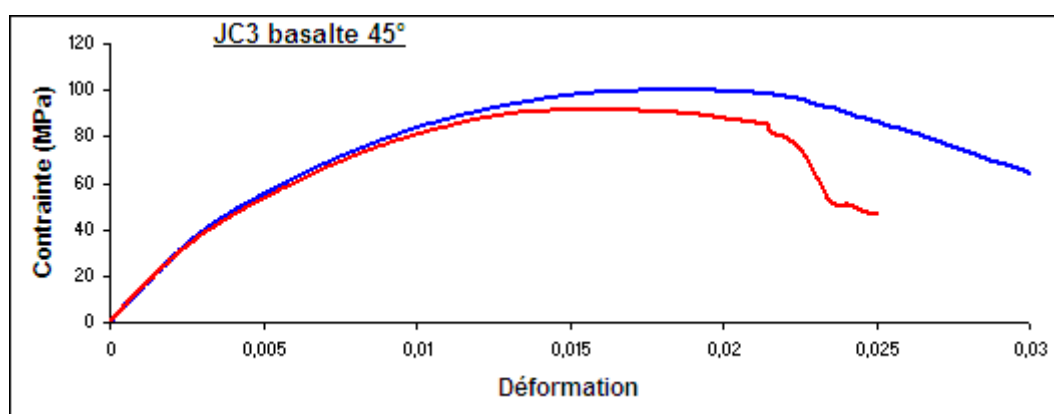


Figure G.17 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de basalte sollicités à 45°

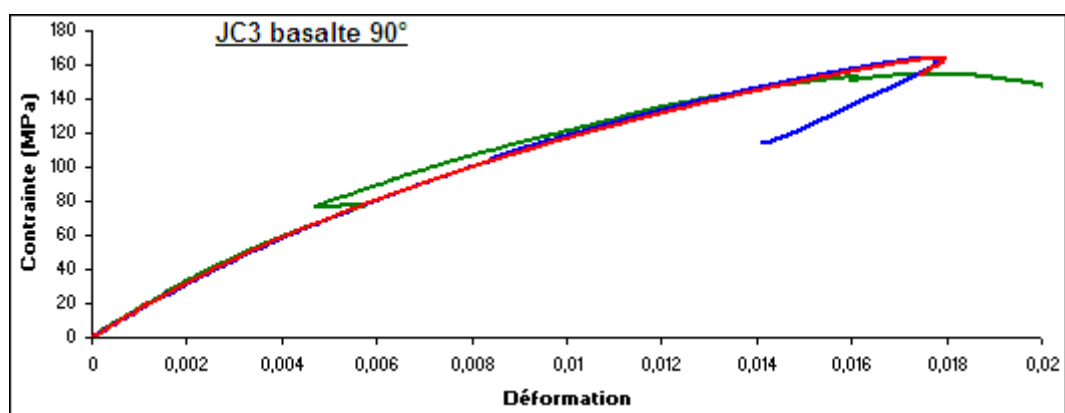


Figure G.18 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de basalte sollicités à 90°

G.7 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC1 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°

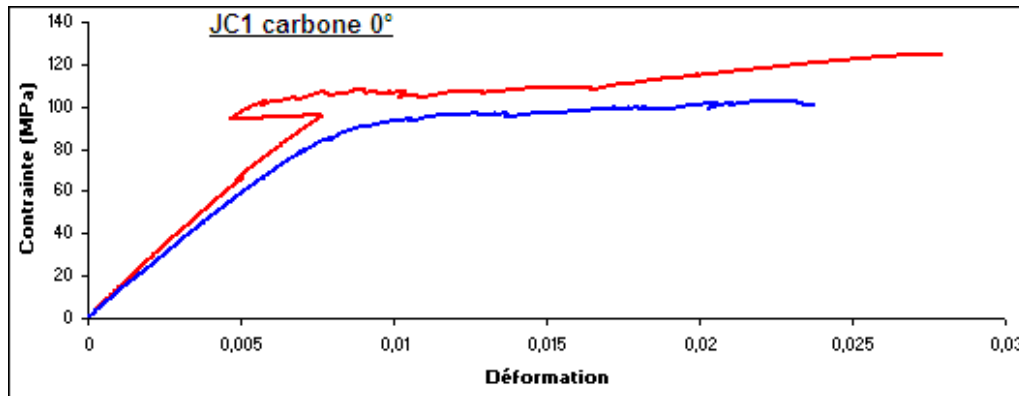


Figure G.19 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de carbone sollicités à 0°

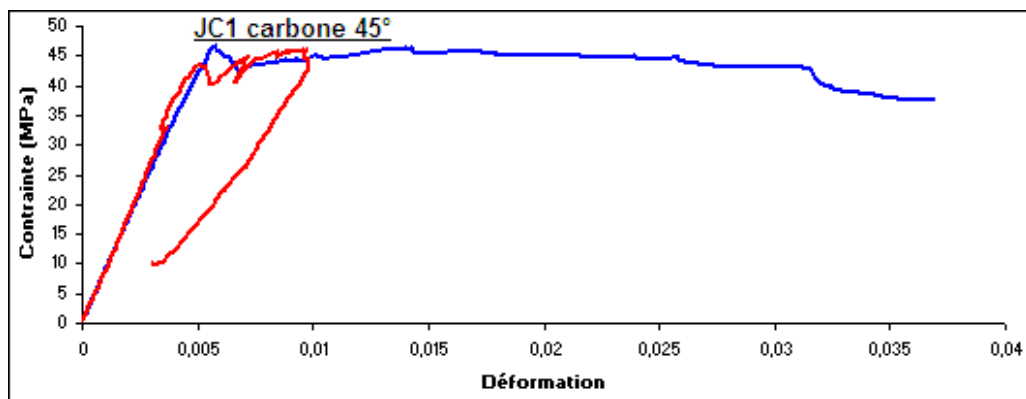


Figure G.20 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de carbone sollicités à 45°

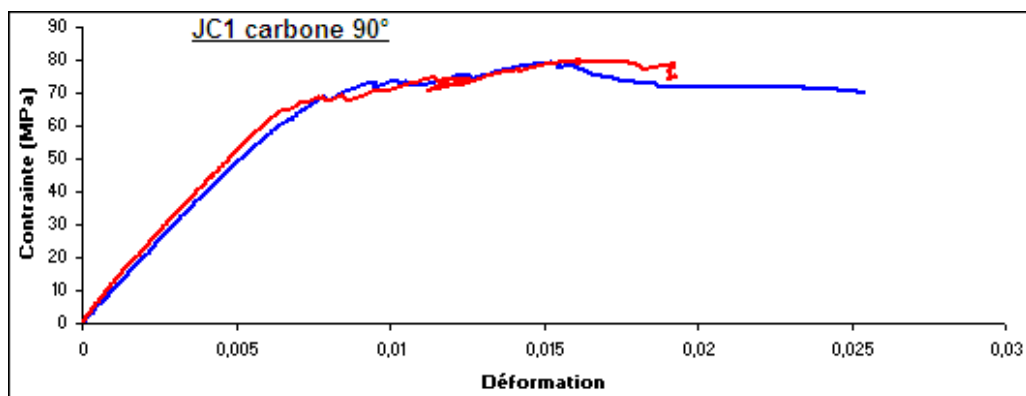


Figure G.21 – Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de carbone sollicités à 90°

G.8 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC2 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°

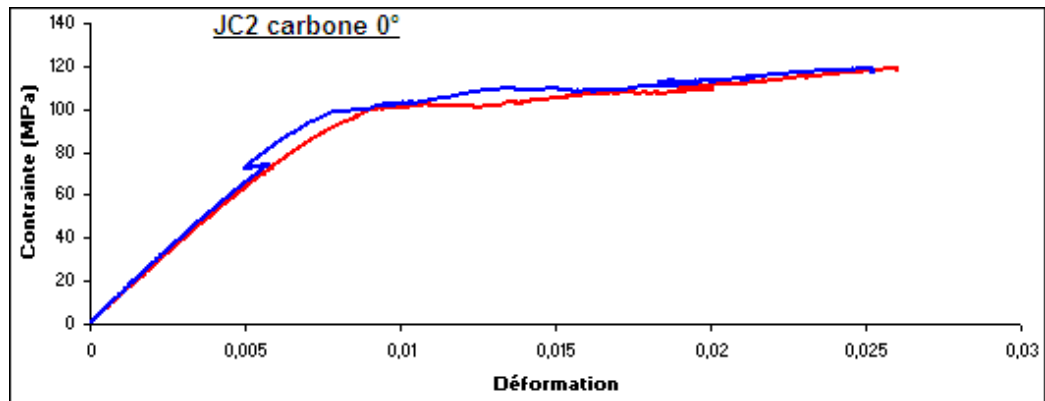


Figure G.22 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de carbone sollicités à 0°

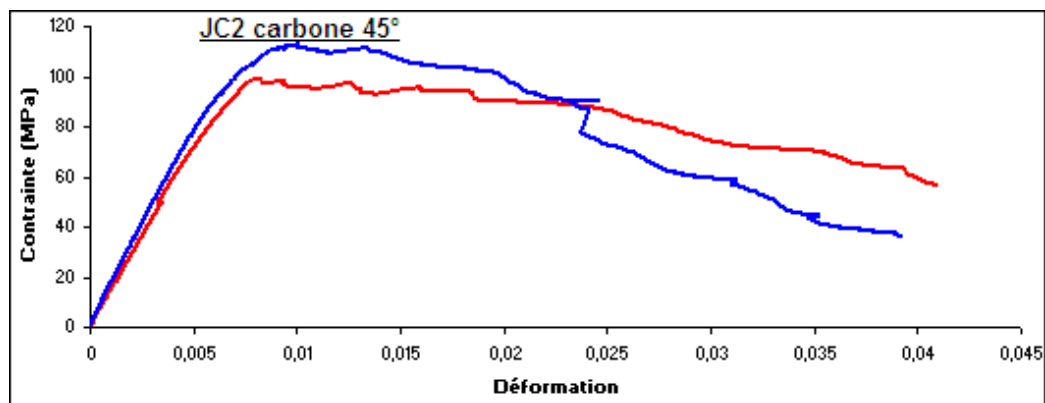


Figure G.23 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de carbone sollicités à 45°

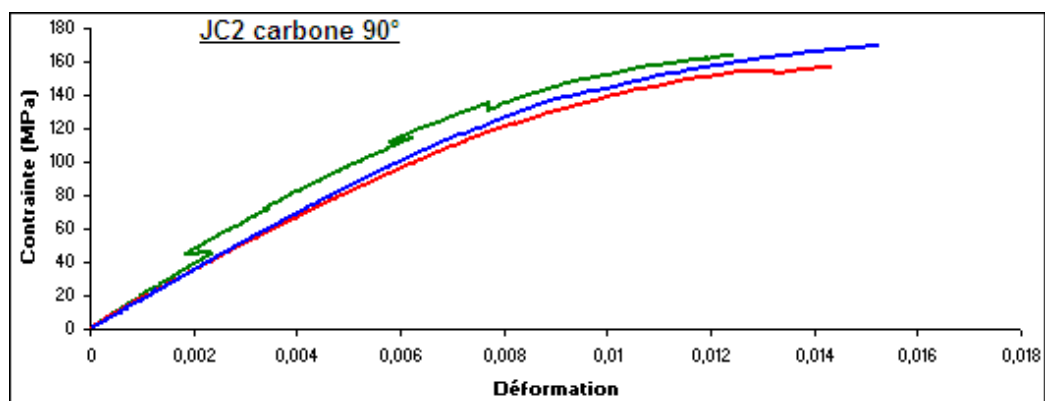


Figure G.24 – Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de carbone sollicités à 90°

G.9 Résultats des essais de traction réalisés sur les composites renforcés de tricot JC3 en fibres de carbone à 0°, 45° et 90°

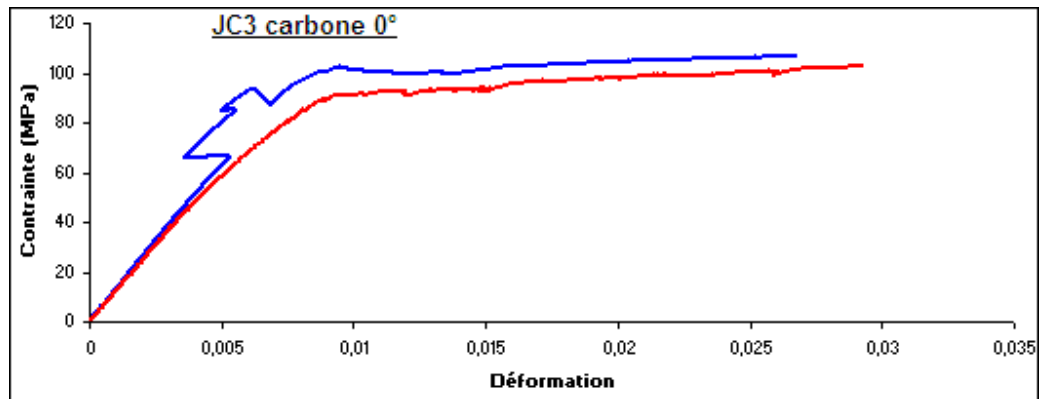


Figure G.25 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de carbone sollicités à 0°

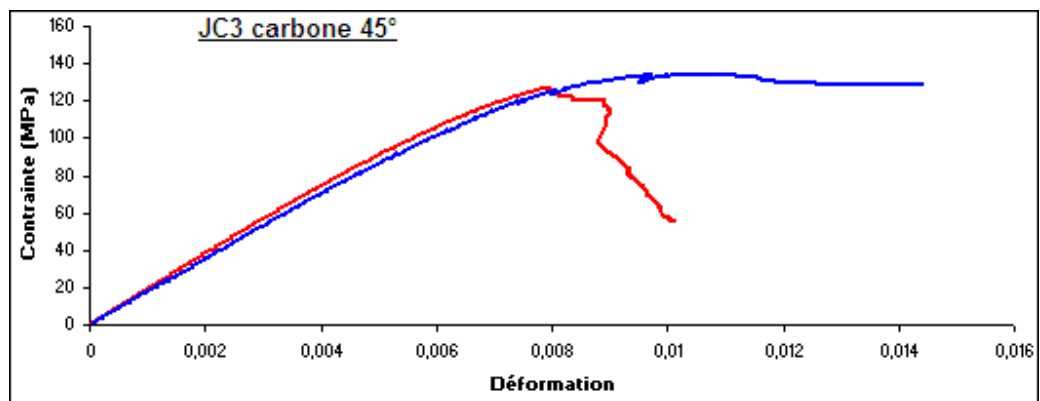


Figure G.26 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de carbone sollicités à 45°

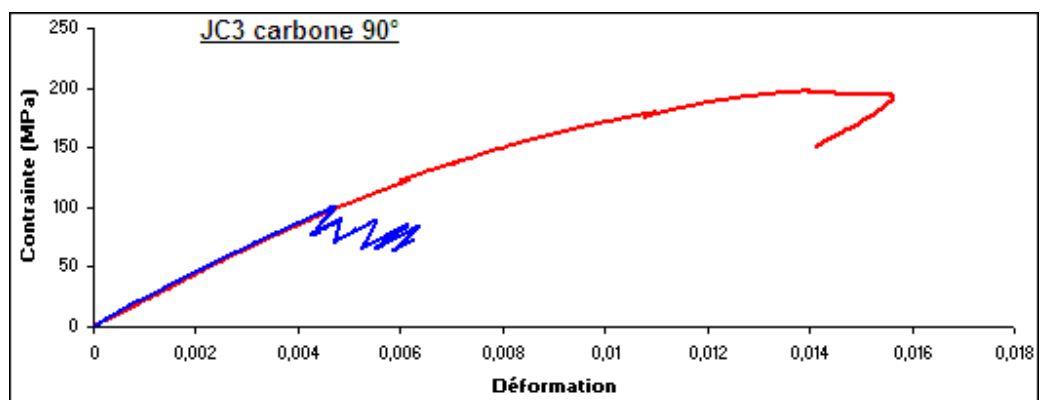


Figure G.27 – Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de carbone sollicités à 90°

Table des figures

1.1	Classification des natures de fibre [3]	7
1.2	Différentes architectures de renfort	10
1.3	Bobine de roving	10
1.4	Comparaison des propriétés des composites à différents types de renforts [7] .	11
1.5	Schémas des procédés RTM et VARTM	11
1.6	Schémas du procédé LRI	12
1.7	(a) Formation d'une maille et (b) chaîne de mailles	13
1.8	(a) Tricot à mailles cueillies et (b) tricot à mailles jetées	13
1.9	(a) métier circulaire; (b) métier rectiligne	14
1.10	schéma d'un métier rectiligne	15
1.11	(a) Système d'actionnement des aiguilles; (b) aiguilles	15
1.12	(a) maille simple; (b) charge	16
1.13	Convention d'écriture des diagrammes techniques des tricots : exemple pour le tricot à mailles cueillies	17
1.14	Tricot jersey et côte : (a) diagramme technique, (b) représentation graphique et (c) représentation 3D	18
1.15	Représentation graphique et vue technique d'un [jersey-flotté-3-Charge] . . .	18
1.16	Représentation graphique et vue technique d'un milano	19
1.17	Schématisation d'une mèche fibreuse	19
1.18	Exemples de préformes tricotées et de composites à renforts tricotés	22
1.19	(a) Courbe de déformations à la rupture en traction biaxiale des tricots côte, milano et d'un tissu [16]; (b) Comparaison des déformation à la rupture en traction uniaxiale d'un tricot et d'un tissu [18]	23
1.20	(a) Comportement général d'un tricot sec en traction [21] et (b) Comparaison des comportements en traction d'un tissu et d'un tricot [20]	23
1.21	Composite thermoplastique à renfort (a) tissé et (b) tricoté après mise en oeuvre par thermoformage [30]	24
1.22	Comparaison de la résistance et du module d'Young normalisés (par rapport au taux de fibres) des composites renforcés de différents types de renforts [32]	25
1.23	Courbe contrainte-déformation de composites à renfort tricoté de contexture côte a) en traction et b) en compression [36]	25
1.24	Influence de la contexture et des paramètres de tricots sur la résistance à la rupture en traction [36]	26
1.25	Courbe de traction d'un composite à renforts tricotés [19]	28
1.26	Rupture caractéristique d'un composite renforcé d'un pli de tricot en fonction de la direction de sollicitation en traction [32]	28
1.27	Éprouvette endommagée après compression [36]	29

1.28	Comparaison des surface et largeurs endommagées après impact de différentes structures composites [47]	30
1.29	Rapport de la résistance CAI par la résistance non-endommagée en fonction de l'énergie d'impact de différentes structures composites [47]	30
1.30	Représentation géométrique d'un tricot jersey par le modèle de (a) Leaf et Glaskin [51], (b) Rudd et al. [38] et (c) Ruan et al.[11]	32
1.31	Représentation de la force appliquée sur la maille à l'état de relaxé dans le modèle de (a) Postle et Munden en 2D [54], (b) de Shanahan et Postle en 3D [56]	33
1.32	Représentation de la CER et des forces appliqués sur le quart de maille isolé du modèle de Araújo [21]	34
1.33	Diagramme de la procédure d'analyse des comportement des composites à renfort tricoté [66]	36
1.34	Modèle de Voigt et de Reuss	37
1.35	Composite unidirectionnel	37
1.36	Diagramme de l'analyse d'un composite à renfort tricoté [76]	41
1.37	Cellule élémentaire représentative (CER) et VER du modèle de Ruan et Chou [11]	42
1.38	Diagramme du modèle analytique de prédiction des propriétés élastiques d'un composite jersey de Ramakrishna [12]	44
1.39	VER du modèle de Ramakrishna [12]	45
1.40	Arrangement des fibres dans la mèche selon un motif (a) concentrique et (b) hexagonal [13]	45
2.1	Arrangement des fibres dans la mèche selon un motif hexagonal [13]	50
2.2	Roving de (a) fibres de verre, (b) de fibres de basalte et (c) de fibres de carbone	50
2.3	Diagramme technique du tricot (a) jersey et (b) côte	51
2.4	Photos des tricots jersey et côte en fibres de verre (a) et (d), de basalte (b) et (e) et de carbone (c) et (f).	52
2.5	Photos des éprouvettes du tricot côte en traction colonne (a) et rangée (b) et du tricot jersey en traction colonne (c) et rangée (d)	53
2.6	Caractéristiques géométriques d'une maille	54
2.7	Montage de l'essai de traction sur tricots secs	56
2.8	Photo d'une éprouvette de traction de tricot sec	56
2.9	Courbe d'effort-déformation d'un tricot sec sollicité en traction	57
2.10	Représentation du point de reprise d'effort sur la courbe d'effort-déplacement tracée à parti des données brutes	58
2.11	Courbe d'effort-déformation des tricots secs simples	59
2.12	Répétabilité de la 1ère et de la seconde phase	59
2.13	Courbe d'effort-déformation d'un tricot sec sollicité en traction	60
2.15	Configuration du tricot jersey au repos, en traction colonne et en traction rangée	60
2.14	Agrandissement des phases a, b, c, d et e de la courbe de comportement en traction d'un tricot sec	61
2.16	Zones de rupture des tricots secs jersey	62
2.17	Courbes d'effort-déformation des tricots côte et jersey en traction colonne . .	63
2.18	Courbes d'effort-déformation des tricots côte et jersey en traction rangée . .	64
2.19	Représentation 3D des contextures (a) jersey et (b) côte	65

2.20	Histogrammes des déformations au blocage des mailles (a) en traction colonne et (b) en traction rangée	65
2.21	1 ^{re} étape des courbes d'effort déformation des tricotés secs simples en fonction de la contexture	66
2.22	Courbes d'effort-déformation des tricotés côte	67
2.23	Courbes d'effort-déformation des tricotés jersey	68
2.24	Histogramme de la déformation structurale critique des tricotés jersey	68
2.25	Structure des tricotés à mailles cueillies	69
2.26	Forme d'une maille en traction (a) colonne et (b) rangée	69
2.27	Comparaison de la 1 ^{re} étape de la courbe d'effort déformation des tricotés secs simples en fonction de la nature de fibre	70
2.28	Histogramme de la déformation critique au blocage des mailles des tricotés secs simples en fonction de la nature de fibre	71
2.29	Histogramme de la rigidité des tricotés secs simples après le blocage des mailles en fonction de la nature de fibre	72
2.30	Histogramme de la résistance à la rupture des tricotés secs simples après le blocage des mailles en fonction de la nature de fibre	72
2.31	Schématisation des tricotés jersey au blocage des mailles en traction colonne et traction rangée	73
2.32	Courbe d'effort-déformation d'un tricot jersey en traction colonne et rangée et d'un tissu satin en fibres de verre	75
2.33	Diagrammes techniques des contextures jersey chargées	77
2.34	Photos des contextures jersey chargé dans les trois natures de fibres	78
2.35	Courbes d'effort-déformation sur les tricotés JC dans les trois natures de fibres	80
2.36	Courbes d'effort-déformation d'un tricot JC1 sollicité dans la direction rangée	81
2.37	Histogramme donnant les déformations critiques des tricotés <i>jersey</i> et <i>JC</i> en fonction de la direction de sollicitation, de la nature de fibre et de la contexture	81
2.38	Agrandissement de la zone de déformation structurale courbes de traction colonne des tricotés JC	82
2.39	Schéma d'un jersey chargé (a) au repos, (b) en traction colonne, (c) en traction rangée	82
2.40	Agrandissement de la zone de déformation structurale courbes de traction rangée des tricotés JC	83
2.41	Histogrammes des rigidités et des résistances des tricotés de contextures <i>jersey</i> et <i>JC</i> de différentes natures de fibre	84
2.42	(a)Capacité de la maille à se déformer en traction colonne en fonction de ses paramètres géométriques et (b) hauteur initiale de la maille des éprouvettes de JC en traction colonne	85
2.43	Courbe d'effort-déformation des tricotés jersey, JC1, JC2 et JC3 en traction rangée et d'un tissu satin en fibres de verre	87
3.1	Courbe de comportement en traction de la résine (SR1710+durcisseur SD8822)	91
3.2	Schéma du procédé de mise en œuvre des composites	93
3.3	Moule de mise en œuvre des plaques composites	94
3.5	(a) Suivi de l'injection de résine ; (b) Mesures de température à l'entrefer du moule	95
3.4	Poste de mise en œuvre des composites	95

3.6	Directions 0° , 45° et 90° du renfort	98
3.7	Éprouvette de traction sur composite	98
3.8	Montage de l'essai de traction sur composite	99
3.9	Courbe de contrainte déformation d'un composite à renfort tricoté	100
3.10	Poste d'essai de stéréo-corrélation	101
3.11	Éprouvette mouchetée utilisée pour la stéréo-corrélation d'images	101
3.12	Propriétés mécaniques déterminées pour l'ensemble des essais réalisés	102
3.13	Représentation des courbes de comportement des composites renforcés de textiles tricotés simples en fonction de la nature de fibre	103
3.14	Représentation des courbes de comportement des composites renforcés de textiles tricotés simples en fonction de la direction de sollicitation	104
3.15	Histogrammes donnant les modules élastiques et contraintes maximales des composites à renforts tricotés simples en fonction de la nature de la fibre	106
3.16	Histogrammes donnant les modules élastiques et contraintes maximales des composites à renforts tricotés simples en fonction de la direction de sollicitation	108
3.17	Histogrammes donnant les modules élastiques et contraintes maximales des composites à renforts tricotés simples en fonction de la contexture	110
3.18	Évolution des champs de déformation longitudinale au cours d'un essai de traction sur composite à renfort jersey et côte	112
3.19	Distribution des champs de déformation longitudinale à la surface des composite à renfort jersey	113
3.20	Distribution des champs de déformation longitudinale à la surface des composite à renfort côte	114
3.21	Localisation des zones de faibles et de fortes déformations sur la surface des composites à renfort jersey	115
3.22	Distribution des champs de déformation longitudinaux, transverses et de cisaillement mesurés sur la surface d'un composite à renfort jersey sollicité à 0° et 90°	116
3.23	Localisation des zones de faibles et de fortes déformations sur la surface des composites à renfort côte	117
3.24	Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort jersey	119
3.25	Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort côte	120
3.26	Endommagement des composites à renfort jersey sollicités dans la direction 0°	121
3.27	Endommagement des composites à renfort jersey sollicités dans la direction 45° et 90°	122
3.28	Endommagement des composites à renfort côte sollicités dans la direction 0°	123
3.29	Endommagement des composites à renfort côte sollicités dans la direction 45°	124
3.30	Endommagement des composites à renfort côte sollicités dans la direction 90°	124
3.31	Courbes de contrainte-déformation des composites renforcés de textiles tricotés de contexture <i>JC</i>	127
3.32	Histogrammes des modules élastiques et des contraintes à la rupture des composites à renfort <i>JC</i> en fonction de la contexture	129
3.33	Histogrammes des modules élastiques et des contraintes à la rupture des composites à renfort <i>JC</i> en fonction de la nature de la fibre	132
3.34	Histogrammes des modules élastiques et des contraintes à la rupture des composites à renfort <i>JC</i> en fonction de la direction de sollicitation	133

3.35	Suivi des champs de déformation au cours d'un essai de traction sur un composite à renfort JC	135
3.36	Champs de déformation des composites à renfort JC1	136
3.37	Photo des tricots (a) JC1, (b) JC2 et (c) JC3 et représentation de la CER . .	137
3.38	Champs de déformation des composites à renfort JC2	139
3.39	Champs de déformation des composites à renfort JC3	140
3.40	Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort JC1	141
3.41	Localisation de la rupture dans les composites à renfort JC1 sollicités à 0° , 45° et 90°	143
3.42	Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort JC2	144
3.43	Localisation de la rupture dans les composites à renfort JC2 sollicités à 0° , 45° et 90°	145
3.44	Photos des éprouvettes endommagées des composites à renfort JC3	146
3.45	Localisation de la rupture dans les composites à renfort JC3 sollicités à 0° , 45° et 90°	147
4.1	Schématisation du fonctionnement général du modèle	153
4.2	Schématisation de la mèche de fibres assimilée à une tige homogène	155
4.3	Schématisation du tricot jersey et de la CER	155
4.4	Représentation des forces et moments appliqués sur le quart de maille isolé .	156
4.5	Analyse du tronçon AB	157
4.6	Analyse du tronçon BC	158
4.7	Initialisation du modèle de comportement du tricot jersey	161
4.8	Fonctionnement du modèle en traction colonne sans évolution du diamètre de mèche	162
4.9	Illustration de la traction colonne sans évolution du diamètre de mèche	163
4.10	Fonctionnement du modèle en traction colonne avec évolution du diamètre de mèche	166
4.11	Illustration de la traction colonne avec évolution du diamètre de mèche	167
4.12	Variation de la demi épaisseur du tricot en fonction de la charge de compression rapporté à une mèche de la CER d'un (a) jersey en fibres de verre et (b) d'un jersey en fibres de verre	168
4.13	Représentation de la CER du tricot jersey	168
4.14	Fonctionnement du modèle de traction rangée	170
4.15	Forme idéalisée de la maille dans la configuration d'extension maximale en rangée	171
4.16	Représentations géométriques des mailles au repos calculées avec un diamètre d_m et un diamètre d_{m0} d'un tricot jersey en (a) fibres de verre et (b) fibres de basalte	175
4.17	Courbes expérimentales et théoriques de traction colonne des jersey en fibres de verre (Pleine échelle)	175
4.18	Courbes expérimentale et théoriques de traction colonne des jersey en fibres de basalte (Pleine échelle)	176
4.19	Représentations des phases du comportement sur les courbes théoriques obtenues avec et sans évolution du diamètre du tricot jersey en (a) fibres de verre et (b) fibres de basalte	176
4.20	Courbes expérimentales et théoriques de comportement du jersey en fibres de verre	178

4.21	Courbes expérimentales et théoriques de comportement du jersey en fibres de basalte	178
4.22	Représentations des valeurs minimales et maximales de $F_{TC}(2)$ choisies pour la traction colonne sur le jersey en (a) fibres de verre et (b) fibres de basalte . .	179
4.23	Courbes expérimentales et théoriques de comportement du jersey en fibres de basalte	179
4.24	Représentation de la déformation rangée en fonction de la déformation colonne	180
4.25	Représentations de la maille de jersey en fibres de verre et de basalte pour différents niveaux de déformation colonne	181
4.26	Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de verre (Pleine échelle)	182
4.27	Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de basalte (Pleine échelle)	182
4.28	Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de verre dans la zone de validité du modèle	183
4.29	Courbes expérimentales et théoriques de traction rangée des jersey en fibres de basalte dans la zone de validité du modèle	183
4.30	Représentations de la maille de jersey en fibres de verre et de basalte pour différents niveaux de déformation rangée	185
4.31	CER des composites à renfort jersey sollicités à 0° , 90° et 45°	186
4.32	Représentation des deux zones comprises dans la CER du composite	187
4.33	Diagrammes techniques des contextures jersey chargées	188
4.34	Photo d'un tricot JC1 en fibres de verre et représentation de la CER	188
4.35	Représentation graphique de la contexture JC1 obtenue avec les modèles géométriques	190
4.36	Représentation graphique de la mèche insérée et comparaison avec le tricot .	191
4.37	Représentation graphique de la contexture JC2 obtenue avec les modèles géométriques	191
4.38	Représentation graphique de la contexture JC3 obtenue avec les modèles géométriques	192
4.39	Discretisation de la mèche courbée	193
4.40	Images MEBE d'échantillons de composite à renfort jersey en fibres de verre et en fibres de basalte pour la détermination du taux de fibres dans la mèche par analyse d'image	194
4.41	Comparaison en fonction de la direction de sollicitation des modules élastiques théoriques et expérimentaux des composites renforcés de fibres a) de verre et b) de basalte	197
4.42	Comparaison en fonction de la contexture du renfort des modules élastiques théoriques et expérimentaux des composites renforcés de fibres a) de verre et b) de basalte	198
4.43	Modules élastiques du composite JC3 en fibres de basalte en fonction de V_{fm}	200
4.44	Modules élastiques théoriques déterminés par la loi des mélanges du composite en fibres de basalte en fonction de la longueur de mèche insérée L_{FC}	201
4.45	Évolutions des modules élastiques des composites en fonction de la prétension dans la direction colonne du renfort en fibres a) de verre et b) de basalte . . .	202
4.46	Évolutions des modules élastiques des composites en fonction de la prétension dans la direction rangée du renfort en fibres a) de verre et b) de basalte . . .	204

A.1	Évolution du moment quadratique d'une mèche de fibres de verre en fonction de le diamètres de sa section circulaire (empilement des filament)	217
A.2	Évolution du module de flexion d'une mèche de fibres de verre en fonction de sa section	217
B.1	Traction colonne Verre Côte	219
B.2	Traction rangée Verre Côte	219
B.3	Traction colonne Verre Jersey	220
B.4	Traction colonne Verre Jersey	220
B.5	Traction colonne Basalte Côte	221
B.6	Traction rangée Basalte Côte	221
B.7	Traction colonne Basalte Jersey	222
B.8	Traction rangée Basalte Jersey	222
B.9	Traction colonne Carbone Côte	223
B.10	Traction rangée Carbone Jersey	223
B.11	Traction colonne Carbone Côte	224
B.12	Traction rangée Carbone Jersey	224
C.1	Traction colonne verre JC1	225
C.2	Traction colonne verre JC2	225
C.3	Traction colonne verre JC3	225
C.4	Traction rangée verre JC1	226
C.5	Traction rangée verre JC2	226
C.6	Traction rangée verre JC3	226
C.7	Traction colonne basalte JC1	227
C.8	Traction colonne basalte JC2	227
C.9	Traction colonne basalte JC3	227
C.10	Traction rangée basalte JC1	228
C.11	Traction rangée basalte JC2	228
C.12	Traction rangée basalte JC3	228
C.13	Traction colonne carbone JC1	229
C.14	Traction colonne carbone JC2	229
C.15	Traction colonne carbone JC3	229
C.16	Traction rangée carbone JC1	230
C.17	Traction rangée carbone JC2	230
C.18	Traction rangée carbone JC3	230
D.1	Courbes donnat la viscosité du mélange de résine en fonction du temps pour des essais réalisés à 20°C et 80°C	231
E.1	Reconstruction 3D - Principe de la triangulation [89]	234
E.2	Principe de la stéréo-corrélation [89]	234
E.3	Exemple d'une séquence de 4 paires d'images d'une mire utilisée pour le calibrage d'un banc de stéréovision	235
F.1	Courbes de comportement des composites côte en fibres de verre sollicités à 0°	237
F.2	Courbes de comportement des composites côte en fibres de verre sollicités à 45°	237
F.3	Courbes de comportement des composites côte en fibres de verre sollicités à 90°	237
F.4	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de verre sollicités à 0°	238
F.5	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de verre sollicités à 45°	238
F.6	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de verre sollicités à 90°	238
F.7	Courbes de comportement des composites côte en fibres de basalte sollicités à 0°	239

F.8	Courbes de comportement des composites côte en fibres de basalte sollicités à 45°	239
F.9	Courbes de comportement des composites côte en fibres de basalte sollicités à 90°	239
F.10	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de basalte sollicités à 0°	240
F.11	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de basalte sollicités à 45°	240
F.12	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de basalte sollicités à 90°	240
F.13	Courbes de comportement des composites côte en fibres de carbone sollicités à 0°	241
F.14	Courbes de comportement des composites côte en fibres de carbone sollicités à 45°	241
F.15	Courbes de comportement des composites côte en fibres de carbone sollicités à 90°	241
F.16	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de carbone sollicités à 0°	242
F.17	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de carbone sollicités à 45°	242
F.18	Courbes de comportement des composites jersey en fibres de carbone sollicités à 90°	242
G.1	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de verre sollicités à 0°	243
G.2	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de verre sollicités à 45°	243
G.3	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de verre sollicités à 90°	243
G.4	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de verre sollicités à 0°	244
G.5	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de verre sollicités à 45°	244
G.6	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de verre sollicités à 90°	244
G.7	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de verre sollicités à 0°	245
G.8	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de verre sollicités à 45°	245
G.9	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de verre sollicités à 90°	245
G.10	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de basalte sollicités à 0°	246
G.11	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de basalte sollicités à 45°	246
G.12	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de basalte sollicités à 90°	246
G.13	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de basalte sollicités à 0°	247
G.14	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de basalte sollicités à 45°	247
G.15	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de basalte sollicités à 90°	247
G.16	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de basalte sollicités à 0°	248
G.17	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de basalte sollicités à 45°	248
G.18	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de basalte sollicités à 90°	248
G.19	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de carbone sollicités à 0°	249
G.20	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de carbone sollicités à 45°	249
G.21	Courbes de comportement des composites JC1 en fibres de carbone sollicités à 90°	249
G.22	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de carbone sollicités à 0°	250
G.23	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de carbone sollicités à 45°	250
G.24	Courbes de comportement des composites JC2 en fibres de carbone sollicités à 90°	250
G.25	Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de carbone sollicités à 0°	251

G.26 Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de carbone sollicités à 45°	251
G.27 Courbes de comportement des composites JC3 en fibres de carbone sollicités à 90°	251

Liste des tableaux

1.1	Propriétés des fibres	9
2.1	Caractéristiques des fibres et des mèches	51
2.2	Caractéristiques des éprouvettes de traction colonne de côte et jersey	55
2.3	Caractéristiques des éprouvettes de traction rangée de côte et jersey	55
2.4	Valeurs donnant le rapport entre la longueur de fil par maille (L_f) et les dimensions de la maille ($b \times h$)	64
2.5	Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres géométriques de la maille sur la déformabilité du tricot	71
2.6	Raideur équivalente $\frac{\Delta F}{\Delta \epsilon}$ en traction des mèches de fibres de verre, de basalte et de carbone	74
2.7	Caractéristiques des éprouvettes de traction colonne de contextures JC1, JC2 et JC3	77
2.8	Caractéristiques des éprouvettes de traction rangée de contextures JC1, JC2, JC3	79
2.9	Valeurs des rigidités et des FAR en traction rangée de l'ensemble des tricots <i>jersey</i> et <i>JC</i>	86
3.1	Caractéristiques de la résine pure (<i>Données fabricant</i>)	92
3.2	Caractéristiques des renforts tricotés de contextures côte et jersey	92
3.3	Caractéristiques des renforts tricotés de contextures JC1, JC2 et JC3	93
3.4	Estimation des taux volumiques théoriques de fibres dans les plaques composites	96
3.5	Valeurs des taux de fibres et des taux de porosités des plaques composites	97
3.6	Propriétés des composites à renforts tricotés de texture côte et jersey et de la résine époxy (sicomin SR1710 + durcisseur SD8822)	105
3.7	Propriétés mécaniques des composites à renforts JC	126
4.1	Données d'entrée du modèle de comportement des tricots secs	173
4.2	Résultats de l'initialisation	174
4.3	Pente de la phase 1 du comportement	177
4.4	Pentes de la courbe de comportement de traction rangée	184
4.5	Propriétés des matériaux	196
4.6	Valeur des modules élastiques expérimentaux et théoriques des composites renforcés de fibres de verre	199
4.7	Valeur des modules élastiques expérimentaux et théoriques des composites renforcés de fibres de basalte	199
4.8	Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction colonne du tricot en fibres de verre	203

4.9	Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction colonne du tricot en fibres de basalte	203
4.10	Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction rangée du tricot en fibres de verre	205
4.11	Variation relative des modules élastiques des composites avec une prétension du renforts dans la direction rangée du tricot en fibres de basalte	205
4.12	Variation relative des modules élastiques des composites à renfort jersey avec une déformation théorique maximale du tricot	205

Bibliographie

- [1] J.M. Berthelot. *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*. Lavoisier Paris, 2005.
- [2] C. Bathias. *Matériaux Composites*. Dunod, 2005.
- [3] N. Bahlouli. Cours matériaux composites / dess mécanique avancée et stratégie industrielle, ufr de physique et ingénierie, ipst-ulp. [http ://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/tdm.htm](http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/tdm.htm).
- [4] M. Reyne. *Technologie des composites*. Lavoisier, 5^{me} edition, 1998.
- [5] J. Militký, V. Kovačič, and V. Bajžík. Mechanical Properties of Basalt Filaments. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 15(5-6) :64–65, 2007.
- [6] K. Van De Velde, P. Kiekens, and L. Van Langenhove. Basalt fibres as reinforcement for composites. In *Proceedings of 10th International Conference on Composites/Nano Engineering, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA*, pages 20–26, 2003.
- [7] I. Verpoest, B. Gommers, G. Huysmans, J. Ivens, Y. Luo, S. Pandita, and D. Philips. The potential of knitted fabrics as a reinforcement for composites. In *Proceedings ICCM-11, 11th International Conference on Composite Materials*, 1997.
- [8] H. F. Nied. Mechanical properties of thermoformed structures with knitted reinforcement. In *Proceedings of third Conference on Rotomoulding, Thermoforming and Stretch-Blow Moulding, Ecole des Mines d’Albi-Carmaux, Albi, France*, 2009.
- [9] T.W. Chou and F.K. Ko. Textile structural composites. *Elsevier Science Publishers*, 3 :72, 1989.
- [10] S.V. Lomov, A.V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, and I. Verpoest. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. *Composites Science and Technology*, 60(11) :2083–2095, 2000.
- [11] X. Ruan and T.W. Chou. Experimental and theoretical studies of the elastic behavior of knitted-fabric composites. *Composites Science and Technology*, 56(12) :1391 – 1403, 1996.
- [12] S. Ramakrishna. Characterization and modeling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 57(1) :1 – 22, 1997.
- [13] J.W.S. Hearle, P. Grosberg, and S. Backer. *Structural mechanics of fibers, yarns, and fabrics*. Wiley-Interscience, New York, 1969.
- [14] S. Ramakrishna, A. Fujita, N.K. Cuong, and H. Hamada. Tensile failure mechanisms of knitted glass fiber fabric reinforced epoxy composites. In *Proceedings of the Japan International Sampe Symposium*, volume 1, pages 661–666. JAPAN CHAPTER OF SAMPE, 1995.

- [15] B. Hagege. *Simulation du comportement mécanique des milieux fibreux en grandes transformations : application aux renforts tricotés*. PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2004.
- [16] Y. Luo and I. Verpoest. Biaxial tension and ultimate deformation of knitted fabric reinforcements. *Composites Part A : applied science and manufacturing*, 33(2) :197–203, 2002.
- [17] B. Gommers, I. Verpoest, and P. Van Houtte. Analysis of knitted fabric reinforced composites : Part 1. fibre orientation distribution. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 29(12) :1579 – 1588, 1998.
- [18] O. Rozant, P.E. Bourban, and J.A.E. Månson. Drapability of dry textile fabrics for stampable thermoplastic preforms. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 31(11) :1167–1177, 2000.
- [19] M. Araújo, R. Figueiro, and H. Hong. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft knitted fabrics for technical applications—part 1 : General considerations and experimental analyses. *AUTEX Research Journal*, 3(3) :111–123, 2003.
- [20] M. Duhovic and D. Bhattacharyya. *Deformation Mechanisms in Knitted Fabric Composites*, chapter 15, pages 265–288. Springer, 2005.
- [21] M. Araújo, R. Figueiro, and H. Hong. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications, part 2 : 3-d model based on the elastica theory. *AUTEX Research Journal*, 3(4) :166–172, 2003.
- [22] S. Savci, J.I. Curiskis, and M.T. Pailthorpe. A study of the deformation of weft-knit preforms for advanced composite structures Part 1 : Dry preform properties. *Composites Science and Technology*, 60(10) :1931–1942, 2000.
- [23] S. Savci, J.I. Curiskis, and M.T. Pailthorpe. A study of the deformation of weft-knit preforms for advanced composite structures Part 2 : The resultant composite. *Composites Science and Technology*, 60(10) :1943–1951, 2000.
- [24] T.C. Lim, S. Ramakrishna, and H.M. Shang. Optimization of the formability of knitted fabric composite sheet by means of combined deep drawing and stretch forming. *Journal of Materials Processing Technology(Netherlands)*, 89 :99–103, 1999.
- [25] T.C. Lim, S. Ramakrishna, and H.M. Shang. Axisymmetric sheet forming of knitted fabric composite by combined stretch forming and deep drawing. *Composites Part B : Engineering*, 30(5) :495–502, 1999.
- [26] T.C. Lim, S. Ramakrishna, and H.M. Shang. Simultaneous stretch forming and deep drawing in axisymmetrical sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 97(1-3) :82–87, 2000.
- [27] T.C. Lim, S. Ramakrishna, and H.M. Shang. Strain field of deep drawn knitted fabric reinforced thermoplastic composite sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 97(1-3) :95–99, 2000.
- [28] T.C. Lim and S. Ramakrishna. Modelling of composite sheet forming : a review. *Composites Part A : Applied science and manufacturing*, 33(4) :515–537, 2002.
- [29] O. Rozant, P.E. Bourban, and J.A.E. Månson. Manufacturing of three dimensional sandwich parts by direct thermoforming. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 32(11) :1593–1601, 2001.

-
- [30] O. Rozant, P.E. Bourban, and J.A.E. Manson. Warp-knit laminates for stampable sandwich preforms. *Composites Science and Technology*, 61(1) :145–156, 2001.
 - [31] Z.M. Huang and S. Ramakrishna. Micromechanical modeling approaches for the stiffness and strength of knitted fabric composites : a review and comparative study. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 31(5) :479 – 501, 2000.
 - [32] Y. Zhang, Z.M. Huang, and S. Ramakrishna. Tensile Behaviour of Multilayer Knitted Fabric Composites with Different Stacking Configuration. *Applied Composite Materials*, 8(4) :279–295, 2001.
 - [33] K.H. Leong, P.J. Falzon, M.K. Bannister, and I. Herszberg. An investigation of the mechanical performance of weft-knit milano-rib glass/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 58(2) :239 – 251, 1998. Australasian Special Issue on Manufacturing Processes and Mechanical Properties Characterisation of Advanced Composites.
 - [34] K.O. Anwar, P.J. Callus, K.H. Leong, J.I. Curiskis, and I. Herszberg. The effect of architecture on the mechanical properties of knitted composites. *Proc. of ICCM-11, Gold Coast, Australia*, 5 :14–18, 1997.
 - [35] S. Ramakrishna and D. Hull. Tensile behaviour of knitted carbon-fibre-fabric/epoxy laminates–part i : Experimental. *Composites Science and Technology*, 50(2) :237 – 247, 1994.
 - [36] K.H. Leong, S. Ramakrishna, Z.M. Huang, and G.A. Bibo. The potential of knitting for engineering composites–a review. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 31(3) :197 – 220, 2000.
 - [37] C.T. Lim, S. Ramakrishna, L.B. Ong, and Z.M. Huang. Investigating the Effects of Anisotropy of Knitted Fabric Reinforced Polymer (KFRP) Composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20(8) :685, 2001.
 - [38] C.D. Rudd, M.J. Owen, and V. Middleton. Mechanical properties of weft knit glass fibre/polyester laminates. *Composites Science and Technology*, 39(3) :261 – 277, 1990.
 - [39] Md. Abounaim, G. Hoffmann, O. Diestel, and C. Cherif. Development of Flat Knitted Spacer Fabrics for Composites using Hybrid Yarns and Investigation of Two-dimensional Mechanical Properties. *Textile Research Journal*, 79(7) :596–610, 2009.
 - [40] O.A. Khondker, I. Herszberg, and K.H. Leong. An investigation of the structure-property relationship of knitted composites. *Journal of Composite Materials*, 35(6) :489, 2001.
 - [41] K.H. Leong, M. Nguyen, and I. Herszberg. The effects of deforming knitted glass fabrics on the basic composite mechanical properties. *Journal of materials Science*, 34(10) :2377–2387, 1999.
 - [42] O.A. Khondker, K.H. Leong, and I. Herszberg. Effects of biaxial deformation of the knitted glass preform on the in-plane mechanical properties of the composite. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 32(10) :1513–1523, 2001.
 - [43] G. Demboski and G. Bogoeva-Gaceva. Properties of weft knitted composites affected by preform stretching. *Applied composite materials*, 8(6) :371–384, 2001.
 - [44] C.R. Rios, S.L. Ogin, C. Lekakou, and K.H. Leong. A study of damage development in a weft knitted fabric reinforced composite. Part 1 : Experiments using model sandwich laminates. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 38(7) :1773–1793, 2007.

- [45] C.R. Rios, S.L. Ogin, C. Lekakou, and K.H. Leong. A study of damage development in a weft knitted fabric reinforced composite. Part 2 : Stress-strain and early cyclic behaviour of composite laminates with realistic fabric layups. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 38(7) :1794–1808, 2007.
- [46] O.A. Khondker, K.H. Leong, and I. Herszberg. Study of composite compressive properties due to biaxial deformation of the weft-knitted glass fabrics. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 32(9) :1303 – 1309, 2001.
- [47] O.A. Khondker, K.H. Leong, I. Herszberg, and H. Hamada. Impact and compression-after-impact performance of weft-knitted glass textile composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 36(5) :638 – 648, 2005.
- [48] A. P. Mouritz, C. Baini, and I. Herszberg. Mode I interlaminar fracture toughness properties of advanced textile fibreglass composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 30(7) :859 – 870, 1999.
- [49] D. Falconnet, P.E. Bourban, S. Pandita, J.A.E. Manson, and I. Verpoest. Fracture toughness of weft-knitted fabric composites. *Composites Part B : Engineering*, 33(8) :579 – 588, 2002.
- [50] S.D. Pandita, D. Falconnet, and I. Verpoest. Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 62(7-8) :1113 – 1123, 2002.
- [51] G.A.V. Leaf and A. Glaskin. The geometry of a plain knitted loop. *Journal of the Textile Institute*, 45 :587 – 605, 1955.
- [52] S. Ramakrishna, H. Hamada, and K.B. Cheng. Analytical procedure for the prediction of elastic properties of plain knitted fabric-reinforced composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 28(1) :25 – 37, 1997.
- [53] S. Ramakrishna, Z. Maekawa, and N.K. Cuong. Analytical methods for prediction of tensile properties of plain knitted fabric reinforced composites. *Advanced Composite Materials*, 6(2) :123–151, 1997.
- [54] R. Postle and D.L. Munden. Analysis of the dry relaxed knitted loop configuration. Part 1 : Two Dimensional Analysis. *Journal of the Textile Institute*, 58 :329–351, 1967.
- [55] R. Postle and D.L. Munden. Analysis of the dry relaxed knitted loop configuration. Part 2 : Three Dimensional Analysis. *Journal of the Textile Institute*, 58 :351–365, 1967.
- [56] W.J. Shanahan and R. Postle. A theoretical analysis of the plain-knitted structure. *Textile Research Journal*, 40(7) :656, 1970.
- [57] B. Hepworth and G.A.V. Leaf. The Mechanics of an Idealized Weft-knitted structure. *Journal of the Textile Institute*, 67(7/8) :241–248, 1976.
- [58] A.V. Truevtsev, S.V. Polyakova, and E.V. Komarova. Configuration of a tricot loop from blended yarn containing nitron fibre. *Fibre Chemistry*, 29(1) :43–49, 1997.
- [59] B.M. MacRory, J.R. McCraith, and A.B. McNamara. The Biaxial Load-Extension Properties of Plain, Weft-Knitted Fabrics– A Theoretical Analysis. *Textile Research Journal*, 45(10) :746–760, 1975.
- [60] W.J. Shanahan and R. Postle. A theoretical analysis of the tensile properties of plain-knitted fabrics, Part 1 : the load-extension curve for fabric extension parallel to the courses. *Journal of the Textile Institute*, 65(4) :200–212, 1974.

-
- [61] W.J. Shanahan and R. Postle. A Theoretical Analysis of the Tensile Properties of Plain-knitted Fabrics, Part 2 : Load-extension Curve for Fabric Extension Parallel to the Wales. *Journal of the Textile Institute*, 65(5) :254–261, 1974.
- [62] H. Hong, M.D. De Araujo, R. Figueiro, and O. Ciobanu. Theoretical Analysis of Load-Extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement. *Textile Research Journal*, 72(11) :991–996, 2002.
- [63] W.L. Wu, H. Hamada, and Z. Maekawa. Computer simulation of the deformation of weft-knitted fabrics for composite materials. *Journal of the Textile Institute*, 85(2) :198–214, 1994.
- [64] M. Araújo, R. Figueiro, and H. Hong. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications, part 3 : 2d hexagonal fea model with non-linear truss elements. *AUTEX Research Journal*, 4(1) :26–32, 2004.
- [65] P. Boisse, J.L. Daniel, A. Gasser, G. Hivet, and D. Soulat. Prise en compte du procédé de fabrication dans la conception des structures composites minces. *Mécanique & Industries*, 1(3) :303 – 311, 2000.
- [66] Z.M. Huang and S Ramakrishna. Modeling mechanical properties of knitted fabric composites - Part I : Overview and geometric description. *Science and Engineering of Composite Materials*, 10(3) :163–188, 2002.
- [67] W. Voigt. Über die Beziehung zwischen den beiden Elastizitätskonstanten isotroper Körper. *Wied. Ann*, 38 :573–587, 1889.
- [68] A. Reuss. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *Z. f. angew. Math.*, 9 :49–58, 1929.
- [69] C.C. Chamis. Mechanics of composite materials- Past, present and future. *Journal of Composites technology and research*, 11 :3–14, 1989.
- [70] M. Uemura, N. Ataka, H. Fukuda, and G. Ben. Practical FRP Structural Strength Calculations., Japan Society of Reinforced Plastics, 1984.
- [71] Z.M. Huang, S. Ramakrishna, and A.A.O. Tay. A micromechanical approach to the tensile strength of a knitted fabric composite. *Journal of Composite Materials*, 33(19) :1758, 1999.
- [72] Z.M. Huang, S. Ramakrishna, and A.A.O. Tay. Unified Micromechanical Model for Estimating Elastic, Elasto-Plastic and Strength Behaviors of Knitted Fabric Reinforced Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19(8) :642–656, 2000.
- [73] Z.M. Huang. Simulation of the mechanical properties of fibrous composites by the bridging micromechanics model. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 32(2) :143 – 172, 2001.
- [74] Z.M. Huang, S. Ramakrishna, Y.Z. Zhang, and A.A.O. Tay. Prediction of Tensile Strength of Multilayer Knitted-Fabric-Reinforced Laminated Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 14(1) :70–83, 2001.
- [75] Z.M. Huang, S. Ramakrishna, and K.H. Leong. Modeling the Tensile Behavior of Milano Rib Knit Fabric Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21(12) :1123–1146, 2002.
- [76] Z.M. Huang and S Ramakrishna. Modeling mechanical properties of knitted fabric composites - Part II : Theoretical description. *Science and Engineering of Composite Materials*, 10(3) :189–211, 2002.

- [77] H. Krenchel. Fibre reinforcement. *Akademisk Forlag, Copenhagen*, 1964.
- [78] S. Ramakrishna and D. Hull. Tensile behaviour of knitted carbon-fibre-fabric/epoxy laminates—part ii : Prediction of tensile properties. *Composites Science and Technology*, 50(2) :249 – 258, 1994.
- [79] JH. Byun and TW. Chou. Effect of yarn twist on the elastic properties of composites. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials (ICCM-10)*(Eds A. Poursartip and K. Street), volume 4, pages 293–299, 1995.
- [80] B. Gommers, I. Verpoest, and P. Van Houtte. Modelling the elastic properties of knitted-fabric-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 56(6) :685 – 694, 1996.
- [81] S. Ramakrishna. Analysis and modeling of plain knitted fabric reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 31(1) :52, 1997.
- [82] M.A. Bueno, M. Renner, and M.J. Pac. Influence of properties at micro- and mesoscopic levels on macroscopic level for weft knitted fabrics. *Journal of Materials Science*, 37 :2965–2974, 2002. 10.1023/A :1016021131193.
- [83] ISO. Verre textile; tissus : Détermination de la force de rupture en traction et de l’allongement à la rupture par la méthode de la bande, 10 1996.
- [84] G. Dusserre and G. Bernhart. Projet rt2i : caractérisation du comportement mécanique et de la perméabilité de renforts tricotés en fibres de verre. simulation de l’injection sur renforts tricotés. Rapport d’étude confidentiel, 12 2008.
- [85] G. Dusserre, E. Jourdain, and G. Bernhart. Effect of deformation on knitted glass preform in-plane permeability. *Polymer Composites*, 32(1) :18–28, 2011.
- [86] Naoufel Ben Salem. étude du comportement mécanique des composites à renfort tricoté. Rapport de Projet de Fin d’Études, 2009.
- [87] S. P. Timoshenko and Gere J.M. *Théorie de la stabilité élastique*. Dunod, 2ème édition, paris edition, 1966.
- [88] N. Decultot. *Formage incrémental de tôle d’aluminium : étude du procédé à l’aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2009.
- [89] D. Garcia. Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d’images. Master’s thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 12 2001.
- [90] J.J. Orteu. Mesure 3d de formes et de déformations par stéréovision. Techniques de l’ingénieur, Traité Génie Mécanique, 2002. BM7015.

Résumé

Les textiles tricotés présentent un grand intérêt pour le renforcement de composites et notamment pour la mise en œuvre de pièces de formes complexes, cependant, l'orientation non alignée des fibres confère au composite des propriétés mécaniques limitées. L'amélioration de ces propriétés nécessite une optimisation de la contexture fibreuse. Dans ce contexte, le travail de thèse vise à étudier le comportement des composites à renforts tricotés et le mettre en relation avec l'architecture du tricot, la nature de la fibre et le comportement du textile sec. Dans un premier temps, le comportement des tricots secs a été étudié en fonction de leur architecture et de la nature de la fibre (verre, basalte et carbone) en se consacrant d'abord aux contextures de référence (côte et jersey), puis en insérant des mèches non tricotés dans la rangée du jersey. Dans une seconde phase, des composites renforcés de ces même contextures ont été élaborés par injection de résine et soumis à des essais de traction. La stéréo-corrélation d'images a été utilisée pour mettre en évidence l'hétérogénéité des déformations due au renfort fibreux et pour expliquer les différences de comportement en fonction de la direction de sollicitation. L'endommagement a été étudié par l'observation des faciès de rupture. Dans une dernière phase, une modélisation semi-analytique du comportement des tricots jersey secs basée sur la théorie de l'élasticité permet d'obtenir un modèle géométrique de la maille jersey quel que soit l'état de déformation du tricot. L'orientation des fibres calculée est utilisée pour alimenter un modèle d'estimation des propriétés élastiques des composites basé sur le principe d'homogénéisation. Les résultats sont comparés avec l'expérience et montrent une bonne corrélation. Ce modèle permet en outre de prendre en compte la présence des mèches insérées dans la rangée du jersey ainsi qu'une prétension initiale du renfort avant mise en œuvre et ainsi, de définir une architecture du renfort optimisée pour améliorer les propriétés du composite.

Mots clés : matériaux composites, renforts tricotés, comportement mécanique, essais de traction, modélisation analytique, méthodes d'homogénéisation

Abstract

Knitted fabrics are of great interest for reinforcing composites and particularly for producing complex and 3D shape parts due to their high drapability and their automation capability. Nevertheless the looped structure of the reinforcement confers to the composite poor in plane mechanical properties. Improving these properties requires an optimization of the fabric architecture. The aim of this thesis is to study the mechanical behaviour of weft-knitted reinforced composites and to relate it with the fabric architecture, the fibre type and the dry preform behaviour. In a first step, tensile behaviour of the dry knitted fabrics has been studied according to their architecture and the fibre type (E-glass, basalt and carbon), focusing first on the basic knitted fabrics (1x1 rib and plain), and then by inserting inlay yarns in the course direction of the plain knit fabric. In a second step, composite plates, reinforced by these knitted preforms were elaborated by resin injection and subjected to tensile tests. Digital Image Correlation has been used to highlight the deformation heterogeneity due to knitted reinforcement and explain the difference of behaviour depending on loading direction. Damages have been studied by the fracture pattern observation. In a last step, the semi-analytical modeling of the plain-knit fabric behaviour, based on the theory of elasticity, gives a geometrical model of the plain stitch for any deformed state of the fabric. The fibre orientation calculated has been used in an homogeneity model for estimating the elastic properties of the resulting composite. Theoretical results are in good agreement with those obtained experimentally. This model allows to take into account the presence of the inlay yarns and also an initial extension of the reinforcement before composite elaboration and thus to define an optimized architecture of the knitted fabric to improve the properties of the composite.

Keywords : composite materials, weft-knitted fabrics, mechanical behaviour, tensile tests, analytical modeling, homogeneity methods